

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DEL SUELO A LA EROSIÓN HÍDRICA
EN LA FINCA EL RECUERDO, ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE SAN
CARLOS – CÓRDOBA**



**AILYN PATRICIA OROZCO TOVAR
JOSÉ MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DEL SUELO A LA EROSIÓN HÍDRICA
EN LA FINCA EL RECUERDO, ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE SAN
CARLOS – CÓRDOBA**

**AILYN PATRICIA OROZCO TOVAR
JOSÉ MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado presentada, en la modalidad de investigación y/o extensión según
resolución 060, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero
Ambiental.**

**Director:
Mónica Cecilia Cantero Benítez, M.Sc. Suelos.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N.º 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

A Dios Todopoderoso

Por permitirme alcanzar esta meta en su tiempo que es perfecto.

A mis padres Ilma y Juan, mis hermanas Adriana, Jhoana y Litzzy

*Por su amor incondicional, por ser el motor de mi vida, por estar siempre ahí,
apoyándome y animándome.*

A mis padres prestados Efigenia y Filiberto

Por su apoyo y su ayuda invaluable.

A mis abuelas Marta y María

Por su cariño y sabios consejos.

*A las que hoy no están a mi lado pero que desde el cielo me acompañan Juana, Julia y
Guillermina.*

A mi amigo, compañero y colega José Ángel,

*Por iniciar conmigo este camino, por su entrega, dedicación y esfuerzo para llevar a
cabo este proyecto.*

A mis hermanas del alma Cinthya y María Alejandra

*Por acompañarme durante todo este proceso, por soportarme y ayudarme, por estar
siempre para mí.*

A mi familia adoptiva López Ortiz

Por su respaldo y ayuda incondicional.

A mi familia de corazón Torres Porto

Por acogerme en su hogar y hacerme un integrante más.

A toda mi familia, en especial a mis tíos Rosita y Andrés

*Y a todos y cada uno de los que creyeron en mí y contribuyeron para que este gran sueño
hoy fuese una realidad.*

A todos ellos, mil gracias.

Ailyn Patricia.

A Dios y la divina virgen María

Por llenarme de sabiduría, entendimiento y valor para afrontar cada situación y culminar esta etapa de mi vida.

A mis abuelos José Miguel y Lorenza

Su apoyo ha sido fundamental, han estado conmigo en los momentos más difíciles. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, y mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mi madre Dianis y mis hermanos Laura, José Alejandro y Salomé

Son la fuerza que me empuja a seguir adelante. Los amo.

A mis tíos Gustavo y María Eugenia

Quienes me han enseñado tantas cosas, entre ellas a no bajar los brazos para poder alcanzar las metas que uno se propone. Gracias por acogerme y brindarme todo lo necesario para concluir mis estudios y realizar mis sueños.

A mis colegas y compañeros Julio Camacho, Laura Pérez y Pavlo Paez,

Por compartir su conocimiento conmigo, llenarme de apoyo y ánimos en este proceso. Y vivir los buenos y malos momentos juntos.

A todos mis verdaderos amigos; Ximena Carolina, Melisa Cristina, María Leonor,

Angie Carolina, Cinthya Margarita y José Luis

Esos seres extraños que pocas veces aparecen en nuestras vidas, seres sin envidia, sin egoísmo y que muchas veces marcan las pautas de nuestra dirección. Siempre son un gran apoyo para mí. Esto también es por ustedes.

A mi compañera, amiga y colega Ailyn Orozco

Por estar ahí siempre y no dejarme perder el rumbo para alcanzar juntos esta meta.

¡Lo Logramos!

José Miguel.

Agradecimiento especial:

A nuestra directora, MSc. Mónica Cantero Benítez y al Ph.D., MSc José Horacio Rivera Posada, por su dedicación, empeño, y valiosos aportes dedicados a esta investigación.

A la MSc. Zoraya Martínez Lara y al MSc. Ivan Dario Bustamante por enriquecer esta investigación con su conocimiento y valiosas recomendaciones.

Agradecimientos:

A la familia Bedoya Pérez, por facilitarnos los medios físicos para llevar a cabo esta investigación.

Al M.Sc Dairo Javier Pérez Polo, por prestar sus conocimientos en el campo de la estadística a través de sus valiosos aportes a esta investigación.

Al Estadístico Jorge Mario Martínez Conde, por su ayuda y colaboración para culminar este estudio.

Al I.A Cesar Muñoz Pretel por su colaboración desinteresada.

Al Ph.D. Teobaldís Mercado Fernández, por su tiempo y colaboración con la investigación.

A nuestras compañeras y colegas Cinthya Torres y Eglendys Nobles por su ayuda incondicional durante el cumplimiento de esta meta.

Al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba y el Centro de Laboratorios de la Universidad de Sucre, por sus servicios durante la fase experimental de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	17
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
1.1 DEGRADACIÓN DE SUELOS	21
1.2 EROSIÓN.....	21
1.3 EROSIÓN HÍDRICA	21
1.4 ECUACIÓN UNIVERSAL DE LA EROSIÓN.....	22
1.5 FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO – K.....	23
1.6 ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL FACTOR K.....	23
1.7 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA ERODABILIDAD DEL SUELO	28
1.7.1 Método directo	28
1.7.2 Métodos indirectos	29
1.8 RELACIÓN DE LA ERODABILIDAD DEL SUELO CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS MISMOS	30
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
2.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO	35
2.3 MÉTODOS PARA CALCULAR EL FACTOR DE ERODABILIDAD (K) DEL SUELO	36

2.4	CLASIFICACIÓN DEL FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO	38
2.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	38
2.6	PLANTEAMIENTO DE PRÁCTICAS DE MANEJO DE SUELOS	39
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1	CÁLCULO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD (K) DEL SUELO A TRAVÉS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS PROPUESTOS	41
3.1.1	Método 1: Ecuación de Wischmeier y Smith.....	41
3.1.2	Método 2: Ecuación de Paulet.....	42
3.1.3	Método 3: Nomograma de Wischmeier y Smith.....	42
3.1.4	Análisis de datos	45
3.2	CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO CON LOS FACTORES DE ERODABILIDAD (K)	50
3.2.1	Análisis de correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo.....	51
3.2.2	Análisis de correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo	52
3.2.3	Análisis de correlación (r) entre las propiedades físicas y químicas del suelo	53
3.2.4	Análisis de correlación (r) de las propiedades físicas con los diferentes factores de erodabilidad	55
3.2.5	Análisis de componentes principales (ACP) entre las propiedades físicas del suelo con relación a los factores de erodabilidad en cada zona	57
3.2.6	Análisis de correlación (r) de las propiedades químicas con los diferentes factores de erodabilidad	59

3.2.7	Análisis de componentes principales (ACP) entre las propiedades químicas del suelo con relación a los factores de erodabilidad en cada zona	60
3.3	PERSPECTIVA AMBIENTAL	63
3.4	PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE MANEJO DEL RECURSO PARA MITIGAR LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL.....	64
3.4.1	Prácticas de manejo para la zona 1 (Pastoreo de ganado).....	65
3.4.2	Prácticas de manejo para la zona 2 (Vegetación nativa).....	67
3.4.3	Prácticas de manejo para la zona 3 (Agrícola recién arada)	68
3.4.4	Prácticas de manejo para la zona 4 (Agrícola solo pasto).....	71
3.4.5	Prácticas de manejo para la zona 5 (Sistema silvopastoril)	72
4.	CONCLUSIONES.....	75
5.	RECOMENDACIONES.....	77
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS	87

LISTADO DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1 Clasificación de separatas del suelo según USDA	87
Anexo 2 Código para la estructura del suelo según USLE	87
Anexo 3 Código para la permeabilidad del suelo según USLE	88
Anexo 4 Cálculos de la permeabilidad del suelo	88
Anexo 5 Descripción de perfiles de suelos	90
Anexo 6 Nomograma para determinar la erodabilidad del suelo Wischmeier y Smith (1978)	96
Anexo 7 Registro fotográfico.....	97
Anexo 8 Resultados test de Shapiro–Wilk.....	101
Anexo 9 Análisis de laboratorio.....	103

LISTADO DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1 Valores de erodabilidad obtenidos por los métodos de Paulet y Wischmeier y Smith para las zonas estudiadas	45
Gráfico 2 Biplot de la relación entre la erodabilidad por tres métodos y las propiedades físicas de varios sistemas de suelo	58
Gráfico 3 Biplot de la relación entre la erodabilidad por tres métodos y las propiedades químicas de varios sistemas de suelo	62

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Localización del área de estudio.....	33

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Descripción de las zonas de muestreo.....	34
Tabla 2 Ubicación geográfica de las zonas de muestreo y grados de pendientes	35
Tabla 3 Análisis de laboratorio realizados a cada muestra de suelo	36
Tabla 4 Clasificación de los grados de erodabilidad según USDA (1962).....	38
Tabla 5 Factor K_1 - Erodabilidad método de la ecuación de Wischmeier y Smith.....	41
Tabla 6 Factor K_2 - Erodabilidad método de Paulet	42
Tabla 7 Factor K_3 - Erodabilidad método nomograma de Wischmeier y Smith	42
Tabla 8 Estadística descriptiva para las propiedades físicas de las zonas analizadas	46
Tabla 9 Estadística descriptiva para las propiedades químicas de las zonas analizadas..	47
Tabla 10 Variabilidad de los datos.....	48
Tabla 11 Análisis de varianza de la respuesta de los rangos de erodabilidad en función de la zona y el método de determinación	49
Tabla 12 Valores medios de los rangos de la respuesta de la erodabilidad del suelo en función de la zona y el método de determinación.....	50
Tabla 13 Rangos para el grado de correlación	50

Tabla 14 Correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo	51
Tabla 15 Correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo	53
Tabla 16 Correlación (r) entre las propiedades físicas y químicas del suelo	54
Tabla 17 Correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo y el factor K	55
Tabla 18 Eigenvalores de los componentes principales para las propiedades físicas del suelo	57
Tabla 19 Pesos de los componentes principales de las propiedades físicas del suelo	57
Tabla 20 Correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo y el factor K	60
Tabla 21 Eigenvalores de los componentes principales para las propiedades químicas del suelo	61
Tabla 22 Pesos de los componentes principales de las propiedades químicas del suelo	61

ACRÓNIMOS

- * **A:** Arena
- * **Amf:** Arena muy fina
- * **Ar:** Arcilla
- * **Ca:** Calcio
- * **CICe:** Capacidad de intercambio catiónico
- * **Da:** Densidad aparente
- * **DPM:** Diámetro ponderado medio
- * **Dr:** Densidad real
- * **Hum:** Humedad
- * **K:** Potasio
- * **K₁:** Factor de erodabilidad por el método 1
- * **K₂:** Factor de erodabilidad por el método 2
- * **K₃:** Factor de erodabilidad por el método 3
- * **L:** Limo
- * **M.O:** Materia orgánica
- * **Mg:** Magnesio
- * **Na:** Sodio
- * **P:** Fósforo
- * **pH:** Potencial de hidrógeno
- * **S:** Azufre
- * **PG:** Pastoreo de ganado
- * **VN:** Vegetación nativa
- * **ARA:** Agrícola recién arado
- * **ASP:** Agrícola solo pastos
- * **SSP:** Sistema silvopastoril

RESUMEN

La erodabilidad (K) es uno de los factores involucrados en la erosión hídrica; indica la susceptibilidad del suelo a ser erosionado ante una fuerza o mecanismo erosivo como el esfuerzo cortante en el agua o el impacto directo de las gotas de lluvia. Existen diversos métodos para el cálculo del factor K, en el presente estudio se utilizaron los métodos indirectos de Paulet (1973) y Wischmeier y Smith (1978) para determinar la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en zona rural del municipio de San Carlos – Córdoba.

Para el estudio se consideraron cinco (5) zonas con diferentes usos del suelo (pastoreo de ganado, con vegetación nativa, agrícola recién arada, agrícola solo pasto, sistema silvopastoril), en las cuales los factores de erodabilidad estuvieron en los rangos de débilmente ($0,1572 \text{ t ha h tm}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) a fuertemente ($0,3843 \text{ t ha h tm}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) erodables según la clasificación del USDA (1962). Los resultados demostraron que el método de Paulet tiene una tendencia a sobreestimar los valores de erodabilidad en comparación con los métodos de la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith, siendo estos últimos los que más se ajustaron al área de estudio.

Se correlacionaron las propiedades físicas y químicas del suelo con los factores de erodabilidad, obteniéndose que las de mayor influencia en la susceptibilidad del mismo a los procesos de erosión hídrica son: limo ($r:0,73$), arena muy fina ($r:0,84$), densidad aparente ($r:0,61$), arcilla ($r:-0,66$), humedad ($r:-0,64$), Ca ($r:-0,62$), pH ($r:-0,55$), Mg ($r:-0,56$) y CICE ($r:-0,65$). Por último se propusieron las prácticas de manejo de suelos de acuerdo a los resultados obtenidos y las características de cada zona analizada.

Palabras Clave: Erodabilidad, Erosión Hídrica, Método de Paulet, Métodos de Wischmeier y Smith, Prácticas de Manejo del Suelo.

ABSTRACT

The erodibility (K) is a factor involved in rainwater erosion; this indicates the susceptibility of the soil to be eroded by an erosive force or mechanism such as shear stress in the water or the direct impact of raindrops. There are several methods for calculating the K factor, in the present study we used the indirect methods of Paulet (1973) and Wischmeier and Smith (1978) to determine the soil susceptibility to water erosion in the rural area of the municipality of San Carlos - Cordoba.

For the study, five (5) zones with different land uses (cattle grazing, native vegetation, freshly plowed agriculture, pasture, silvopastoral system) were considered, in which erodibility factors were in the range of weakly $0,1572 \text{ t ha h tm}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) to strongly ($0,3843 \text{ t ha h tm}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) erodables according to the USDA classification (1962). The results showed that the Paulet method has a tendency to overestimate the values of erodibility in comparison with the methods of the equation and the nomogram of Wischmeier and Smith, being the latter the ones that more adjusted to the area of study.

The physical and chemical properties of the soil were correlated with the erodibility factors, with the most influential in the soil susceptibility to water erosion processes: silt (r: 0,73), very fine sand (r:0,84) , apparent density (r:0,61), moisture (r: -0,64), Ca (r:-0,62), pH (r: -0,55), clay (r: -0,66), Mg (r: -0,56) and CICE (r: -0,65). Finally, the practices of soil management were proposed according to the results obtained and the characteristics of each area analyzed.

Key Words: Erodibility, Rainwater Erosion, Paulet Method, Wischmeier and Smith Methods, Soil Management Practices.

INTRODUCCIÓN

La erosión es la remoción particulada del suelo por el agua o el viento a tasas que exceden la formación del mismo; este proceso es un problema ambiental muy serio que está afectando a la mayoría de los países de América Latina, y se considera mucho más dramático que la reducción de la capa de ozono y la posibilidad de un efecto invernadero, porque está afectando actualmente la subsistencia de millones de personas (FAO 1992).

Dentro de los procesos erosivos se encuentra la erosión hídrica, la cual se considera como un proceso degradativo que disminuye la productividad de los suelos afectados (FAO 1992; Adema et al. 2001). Según Díez (2007) uno de los factores involucrados en la erosión hídrica es la erodabilidad, la cual indica la susceptibilidad del suelo a ser erosionado ante una fuerza o mecanismo erosivo como el esfuerzo cortante en el agua o el impacto directo de las gotas de lluvia, es una característica propia del suelo ligada a su granulometría, estructura y condiciones hidrológicas (FAO 1992).

Una parte considerable del municipio de San Carlos, departamento de Córdoba, está siendo afectada por procesos de erosión, causados principalmente por la tumba, despalite, quema y tala indiscriminada de los bosques, especialmente en la zona sur, en la que estos procesos se ven aumentados por la ganadería extensiva y la ocurrencia de colinas con alturas de hasta 250 metros sobre el nivel del mar y pendientes que logran superar el 50% (CORDECOR 2012).

Ante la escasez de información sobre los procesos erosivos en la región, es fundamental el desarrollo de estudios que contribuyan con datos sobre el grado y magnitud de dichos procesos, así como los factores que inciden en el desarrollo de los mismos; esto con el fin de contar con las bases necesarias para facilitar la búsqueda de soluciones a esta problemática ambiental. Teniendo en cuenta que la erodabilidad es determinante en los procesos de erosión, el cálculo de este factor permitirá conocer la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en las zonas de interés.

Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue determinar el factor de erodabilidad intrínseca del suelo en la finca El Recuerdo, zona rural del municipio de San Carlos - Córdoba, a partir de algunas de sus propiedades físicas y químicas para

conocer la susceptibilidad de éste a la erosión hídrica. Para ello se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Calcular el factor de erodabilidad (K) intrínseca del suelo a través de diferentes métodos, con base en sus propiedades físicas y químicas.
- Correlacionar las propiedades físicas y químicas del suelo con el factor de erodabilidad (K).
- Proponer prácticas de manejo del recurso que mitiguen la problemática ambiental.

Además de conocer la susceptibilidad del suelo ante procesos erosivos, la investigación permitió proponer las prácticas de manejo que pueden aplicarse en la zona estudiada para mitigar la problemática ambiental, esta investigación también podrá servir de base para posteriores estudios que se desarrollen en la región.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 DEGRADACIÓN DE SUELOS

Según FAO (2016) la degradación del suelo se define como un cambio en la salud del mismo que resulta en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios ambientales.

Zárate y Ramírez (2004) citados por Zavala et al. (2011) definen la degradación de suelos como un proceso de transformación de una extensión árida, semiárida, subhúmeda o húmeda a un espacio con menos vida, este proceso conduce a la destrucción de los ecosistemas, de la productividad natural y a la reducción del potencial económico de estas áreas. Los principales procesos de degradación de los suelos pueden ser integrados en dos grupos; el primero que hace referencia al desplazamiento del suelo, incluye la erosión hídrica y la erosión eólica y el segundo al deterioro interno del suelo, que contempla la degradación química y física (Porta y López 2005; Zavala et al. 2011)

1.2 EROSIÓN

Por erosión de suelos se entiende la remoción y pérdida del suelo por la acción del agua y el viento, con disminución de sus componentes minerales y orgánicos más finos. La erosión está originada por la combinación de varios factores, tales como las pendientes pronunciadas, el clima, las características del suelo, su uso y gestión, el tipo y el estado de la cubierta vegetal (Almorox et al. 2010).

1.3 EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hídrica es la disminución del espesor del suelo superficial, debido a la remoción de los materiales del suelo, por la acción de los impactos de las gotas de lluvia y la escorrentía, que se genera sobre el suelo al ser saturado por el agua acumulada (Zavala et al. 2011).

Es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociada a los eventos pluviométricos. El efecto del agente causal, agua lluvia, se magnifica cuando se conjugan otras variables, como la pendiente abrupta o escarpada de los terrenos, la

deficiencia de cobertura vegetal y la condición textural o el imperfecto desarrollo estructural de los suelos (Núñez 2001).

Para Rivera (1999) la erosión hídrica es un proceso continuo que consiste en la separación de las partículas y agregados de la masa del suelo y su transporte, siendo el agente activo el agua. Inicia cuando las gotas de lluvia golpean los agregados en la superficie de un suelo desnudo, causando el movimiento de las partículas más finas como sedimento en suspensión en el flujo del agua.

1.4 ECUACIÓN UNIVERSAL DE LA EROSIÓN

Para determinar el potencial de erosión en campos agrícolas se desarrollaron una gran cantidad de ecuaciones con base en los diversos parámetros que afectan la erosión. De estos modelos empíricos el más conocido es la Ecuación Universal de Pérdidas de suelo desarrollada por Wischmeier y Smith en 1960. El modelo paramétrico permite la evaluación de las pérdidas de suelo, incluyendo tanto la erosión laminar como la erosión en surcos mediante la expresión (Suárez 2001):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad \text{Ec. 1.}$$

Dónde:

A= Pérdida media anual de suelo, expresado en unidades $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$

R = Erosividad de la lluvia, expresado en: $\text{tm cm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$

K = Erodabilidad del suelo, expresado en: $\text{ton ha h tm}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$

LS = Factor longitud y gradiente de la pendiente, adimensional

C = Cobertura vegetal y manejo del recurso, adimensional

P = Técnicas de conservación aplicadas al suelo, adimensional

1.5 FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO – K

Es la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión, debido a la facilidad de desprendimiento de sus partículas por acción del agua o el viento, la pendiente y clase textural. La erodabilidad es dinámica, cambia durante una tormenta, durante el año o de año a año. Los suelos pueden variar en su contenido de humedad y con ello en su resistencia a la erosión (FAO 1992).

Según Wischmeier y Smith (1978) citados por Hincapié y Rivera (2003) la erodabilidad es una descripción cuantitativa inherente de un suelo determinado, que indica la susceptibilidad de éste a ser erosionado y es considerado como el principal factor para la predicción de la erosión y la planificación del uso del suelo.

El factor de erodabilidad del suelo es un valor cuantitativo que depende de las propiedades de cada suelo. Al actuar en la fórmula general de la erosión causada por el agua y en igualdad de los otros factores erosivos, influye sobre el total del suelo perdido, aumentando la degradación específica, cuando sus valores son altos o reduciéndola en el caso contrario (Machados 1978).

1.6 ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL FACTOR K

Con motivo de la declaración por parte de la ONU de 2015 como Año Internacional de los Suelos, el presidente de la SECS (Sociedad Española de la Ciencia del Suelo), Jaime Porta, ha explicado que cada año se pierde en todo el mundo una superficie de suelo equivalente a Costa Rica, por lo que ha reclamado a la sociedad medidas y aportaciones individuales, argumentando que "Cada pequeña acción individual nos lleva a la sostenibilidad o a la degradación colectiva del recurso" (Europa 2015).

La metodología de la USLE ha sido adaptada a las condiciones de casi todos los países del mundo para estimar la pérdida anual de suelos. Estudios realizados en la cuenca hidrográfica modal serrana bonaerense (Argentina) del arroyo Ventana, tuvo como objetivo principal realizar un diagnóstico espacial, temporal y económico de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. A través de este estudio se obtuvo que el material rocoso estaba marcado por un amplio grado de impermeabilidad, así mismo, las

pronunciadas pendientes y la ausencia de prácticas agroforestales adecuadas, aumentaban considerablemente los valores de escurrimiento, propiciando el consecuente incremento de la erosión hídrica superficial y ocasionando la pérdida del recurso. Además, los resultados económicos mostraron que debido al elevado monto de pérdida anual regional, se refuerza la importancia de generar un plan de ordenamiento territorial para manejo de los suelos en la zona, destacando así que las consecuencias negativas de la pérdida de suelo no se plasman únicamente a nivel ecológico, sino también en la economía; ya que la productividad de los cultivos sufre una disminución de ingresos en los distintos sectores involucrados (Gaspari et al. 2009).

En Colombia, Alarcón y Reyes (2013) realizaron estudios en el municipio de Dagua – Valle del Cauca donde evaluaron el índice de erodabilidad del suelo siguiendo la metodología USLE y empleando un simulador de lluvia en la unidad conformada por los suelos Typic Dystrudepts, Typic Hapludands y Andic Dystrudepts, bajo las condiciones de suelo descubierto o desnudo y suelos con cultivo de café (un año de edad) y de frijol (1 mes de edad). En los resultados generales encontraron que la erosión del suelo desnudo es superior a la presentada en ambos cultivos y la erosión del suelo con cultivo de frijol es mayor a la erosión con cultivo de café. La erodabilidad es uno de los factores de mayor importancia en el suelo frente a la erosión, por ello es indispensable tener presente cuan susceptible son los suelos de cada región ante este proceso de degradación física.

La mayor parte de los estudios sobre el factor erodabilidad del suelo en Colombia se han realizado en la zona cafetera del país. En la unidad Chinchiná, *Melanudands*, en cuatro localidades con suelos de esta unidad, se determinó en condiciones de campo y laboratorio el factor erodabilidad entre surcos (Ki -WEPP); para ello se utilizó un simulador aplicando una intensidad de lluvia de 100 mm h^{-1} durante una hora. Se utilizaron tres metodologías: 1. parcelas de 1 m^2 en condiciones de campo; 2. moldes de $0,0825 \text{ m}^2$ y muestras de suelo no disturbadas en laboratorio; y 3. bandejas de $0,0825 \text{ m}^2$ y muestras disturbadas en laboratorio; estas últimas se separaron y se clasificaron por tamaños de los agregados: 2-1, 1-0,5 y $<0,5 \text{ mm}$ de diámetro promedio. Se correlacionó entre sí el factor erodabilidad determinado en campo y laboratorio. El factor Ki-WEPP

determinado en campo varió entre 107.519 a 159.425 kg s m⁻⁴; en laboratorio osciló entre 90.814 kg s m⁻⁴ y 2.496.129 kg s m⁻⁴. Los valores de Ki más bajos se presentaron en laboratorio para los agregados de 2-1 mm y los mayores en las muestras con agregados <0,5 mm de diámetro promedio. Se encontró correlación lineal simple entre las determinaciones de campo y laboratorio, excepto para los agregados <0,5 mm de diámetro promedio. La mejor correlación del factor Ki entre campo y laboratorio se obtuvo con las muestras no disturbadas con una asociación lineal y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,40$ significativo al 1% (Hincapié y Rivera 2003).

Los valores de erodabilidad del suelo se pueden espacializar a su vez en mapas de isolíneas denominados mapas de isoerodabilidad, en los cuales se plasman las zonas con igual factor de erodabilidad del suelo y permiten orientar en forma acertada el uso, manejo y conservación del recurso. Esto fue lo que se realizó en la cuenca alta del río Bogotá utilizando el sistema de información geográfica ARC-INFOTM¹, en el cual se presentan los mapas de zonas de erodabilidad para los suelos de la cuenca alta del río Bogotá, usando como criterios de interpretación los propuestos por USDA (1962) y con base en el mapa de asociaciones de suelo del estudio general de suelos con fines agrícolas para la cuenca alta del río. El factor de erodabilidad (K), se calculó por los métodos indirectos de Wischmeier y Smith (1978) y Paulet (1973), sobre un total de 96 perfiles de suelos representativos, tomados de ocho estudios de suelos generales, semidetallados y detallados que incluían algunas zonas de la cuenca alta del río Bogotá (Santos y González 1999).

En el departamento del Cauca se evaluó la susceptibilidad a la erosión y de las propiedades asociadas (infiltración y escorrentía) de dos suelos de ladera en las localidades de Santander de Quilichao (Inceptisol) y Mondomó (Inceptisol), en él se tuvo como objetivo principal determinar si los sistemas de manejo del suelo establecidos han producido diferencias en las propiedades físicas relacionadas con la susceptibilidad del mismo a la erosión. En condiciones de campo y con la ayuda de un minisimulador de lluvia construido y diseñado en CIAT, se hicieron evaluaciones de infiltración, escorrentía y suelo perdido bajo dos intensidades de lluvia (80 y 120 mm h⁻¹) en los tratamientos diseñados para la conservación de los suelos. Los usos de suelo estudiados

fueron: bosque, pastura, suelo desnudo, yuca en monocultivo, rotación de cultivos con manejo intensivo, rotación de cultivos con barbecho, rotación de cultivos con cobertura de leguminosa, rotación de cultivos con adiciones de gallinaza y rotación de cultivos en mínima labranza. Para complementar las evaluaciones hechas con el mini simulador se tomaron muestras y se determinaron las propiedades físicas más relacionadas con erodabilidad. Los resultados mostraron que la cantidad de suelo erosionado estuvo relacionado con la escorrentía y con la intensidad de la lluvia. El aumento en la intensidad produjo aumento en la lámina de escorrentía y en la cantidad de suelo perdido. En Mondomó, los sistemas de bosque y suelo desnudo fueron los que menos presentaron pérdida de suelo, mientras que los sistemas bajo rotación de cultivos y rotación con mínima labranza fueron los que mayor escorrentía y pérdida de suelo presentaron. Se observó que el suelo de Mondomó es más sensible a las acciones de uso y manejo que el de Santander, pues en esta localidad no se presentaron diferencias significativas entre los sistemas de uso del suelo (Torres 2000).

A nivel internacional muchos investigadores han tratado de establecer el valor de la erodabilidad del suelo. En Shiwaliks – India, Singh y Khera (2008) por medio de un experimento de campo evaluaron índices de erodabilidad del suelo en relación con la escorrentía superficial y la pérdida de suelo en el trecho submontano del Punjab (India). El estudio se realizó en condiciones de precipitación natural y simulada en cuatro localidades y bajo cuatro usos del suelo en cada localidad: suelo desnudo, uso como campo de cultivo, como pastizal o como bosque. Se observó que los valores de cociente de dispersión, cociente de arcilla (CR), y cociente de arcilla modificado (MCR) alcanzaron sus máximos en la localidad de Ballawal Saunkhri II (India), el cociente de erosión tuvo su máximo en Saleran (India), mientras que los agregados estables en agua (WSA) tuvieron su máximo en la localidad de Kokowal Majari. Entre los diferentes usos del suelo los índices tuvieron el siguiente orden: desnudo = cultivado > pastizal > bosque. También se encontró que los WSA y el MCR son los índices de erodabilidad del suelo más eficientes.

La erodabilidad de los suelos se puede medir en campo mediante simuladores de lluvia o predecir mediante modelos matemáticos como lo son USLE (Ecuación Universal de

Pérdida de Suelo) y WEPP (Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua). En la región semiárida de Argentina se realizaron estudios con respecto a la erodabilidad de los suelos y a las propiedades de éstos que más influyen al aumento de ésta. El objetivo del trabajo fue medir la erodabilidad de tres suelos representativos del Sur de la región y compararla con la estimada por los modelos WEPP y USLE. En los suelos Bahía Blanca (SBB) y Cabildo (SC) -*Paleustoles Petrocálcicos*- y Villarino (SV) -*Calciustol Petrocálcico* se aplicaron, mediante un simulador portátil, dos lluvias consecutivas de 32 mm en 30 minutos. Las pérdidas de suelo debido a la 1° y 2° lluvia indicaron: SV 3,26 y 5,86 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SC 2,04 y 5,53 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SBB 0,75 y 2,66 Mg ha⁻¹ h⁻¹, respectivamente. La resistencia del suelo a la erosión correlacionó con la relación limo: arcilla (r:0,60), CO (r:0,55) y estabilidad estructural (r:0,56). Los resultados arrojaron que en el modelo WEPP, la erodabilidad medida entre surcos (K_i) fue, para SV: 2,5; SC: 1,89 y SBB: 1,39 (106 kg s m⁻⁴); mientras que la estimada (K_b) fue significativamente más alta, SV: 6,26; SC: 10,2 y SBB: 10,2 (106 kg s m⁻⁴). Los índices de erosión (IE) fueron, SV: 0,30; SC: 0,21 y SBB: 0,10 Mg MJ⁻¹ y discreparon significativamente de los valores K estimados a partir del nomograma, confirmando que las predicciones del mismo resultan poco confiables en suelos con el 65% o más de arenas (Echeverría et al. 2006).

A través de algunos estudios se ha evaluado la erodabilidad de suelos en el sureste de Nigeria mediante cuatro métodos diferentes: tamizado en húmedo, el nomograma, simulador de lluvia y los datos de pérdida real del suelo. Los valores de estabilidad de agregados de suelo fueron generalmente altos; desde 70 hasta 92 por ciento en cinco suelos más estables. Los valores estimados de erodabilidad del suelo expresados en unidades de Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ oscilaron entre 0,002 a 0,058 utilizando el nomograma, y 0,006 a 0,09 y 0,002 hasta 0,07 para las pistas secas y húmedas, respectivamente, utilizando el simulador de lluvia. El orden de erodabilidad evaluado para los diferentes suelos varió con el índice utilizado y las condiciones del suelo predominantes. Las medidas reales de la pérdida de suelo con textura franco arenosa de uno de los lugares que tipifican los suelos dominantes de la región dieron valor de erodabilidad de 0,007 en comparación con valores de 0,012 y 0,03 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ utilizando el nomograma y las técnicas del simulador de lluvia. Así, el nomograma no parece ser eficaz para ésta y

otras tierras en el sureste de Nigeria. También el uso del simulador de lluvia en una microparcela ($0,036 \text{ m}^2$) que parece tener serias limitaciones, incluso para los estudios comparativos en este y suelos similares de la zona debido a la gran variabilidad en microambientes. La técnica de estabilidad de los agregados del suelo fue la menos significativa para determinar erodabilidad de éstos (Obi et al. 1989).

En China, Xua et al. (2015) estudiaron la degradación de la calidad físico-química del suelo por erosión en cárcavas en las tierras de cultivo en pendiente de la meseta montañosa de Loess ubicada en este país, y compararon los resultados en cuanto a la susceptibilidad de los suelos de la meseta y suelos de terrazas aluviales; obteniendo como resultados que de manera general todas las propiedades del suelo mostraron una variación baja en toda la región de investigación. Este comportamiento demostró que las propiedades fisicoquímicas del suelo en la zona de alta pendiente en la región montañosa de Loess eran bastante constantes y uniformes, que era un resultado integral de la homogeneidad del material parental de la meseta, así como prácticas de gestión de cultivo históricamente similares. Pero en comparación con el suelo en la terraza aluvial de la región, el suelo en terrenos con pendiente presentaba baja cohesión, con una densidad aparente menor y mayor porosidad; la estructura del suelo era pobre, con menos agua agregada estable; la textura era más alta en la arena y el limo, lo que podría ser el resultado de la erosión selectiva del suelo. Los niveles de nutrientes en los suelos ubicados en pendiente también fueron más bajos en comparación con los de la terraza aluvial. En su conjunto, las estadísticas descriptivas reflejaron que los suelos en la zona de pendiente eran más homogéneos, relativamente infértiles y más susceptibles a la erosión.

1.7 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA ERODABILIDAD DEL SUELO

1.7.1 Método directo

La medición directa de la erodabilidad se realiza utilizando parcelas de escorrentía bajo condiciones de lluvia natural, las cuales requieren una cantidad considerable de tiempo (5-20 años), equipos, mano de obra y dinero; razón por la cual actualmente es un método poco práctico y muy costoso (Lal 1988).

1.7.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos más completos para estimar el valor de K (Erodabilidad) son la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith (1978), los cuales requieren datos muy pormenorizados como porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad; considerando que estos factores en el orden mencionado son los que determinan la erodabilidad de cada suelo (González del Tánago 1991).

El método gráfico o nomograma de erodabilidad es la manera más tradicional de estimar el factor K, a pesar de representar la misma ecuación del método de Wischmeier y Smith, es menos exacto, debido al sesgo visual en que puede incurrir el usuario (Anexo 6). La determinación gráfica del factor erodabilidad se efectúa proyectando siempre en líneas rectas en el interior del nomograma las propiedades físicas y químicas de suelo determinadas en el método anterior.

Según estudios, realizados por Paulet (1967) citados por Machados (1978), el orden de importancia de las variables tomadas para estimar el factor K obtenido de un análisis de correlación múltiple, es el siguiente: % de arena, densidad aparente en gr cm^{-3} , % de limo, % de materia orgánica y % de arcilla. Con base en las 3 variables más importantes (arena, densidad aparente y limo), el autor presenta tres ecuaciones de predicción del factor K. En la primera se combinan las tres variables, en la segunda incluye dos (arena y densidad aparente) y en la tercera toma solo una (la arena). El autor calcula los valores del factor K con la ayuda de las tres ecuaciones, en ocho tipos de suelos americanos, en donde el factor K se determinó por el sistema directo. Compara los resultados obtenidos en cada caso (método indirecto), con el obtenido por el método experimental (directo). Los resultados de la comparación le permiten concluir que pueden utilizarse las tres ecuaciones para obtener el valor del factor K, en tanto que se logre encontrar otro método mejor. Sin embargo, anota que deben preferirse las dos primeras ecuaciones, es decir, las de 3 y 2 variables. Estas ecuaciones son consideradas como el método indirecto de Paulet.

El factor K en el Sistema Internacional de unidades esta dado en $t\ ha\ h\ tm^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

1.8 RELACIÓN DE LA ERODABILIDAD DEL SUELO CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS MISMOS

No sólo es importante determinar el valor de la erodabilidad de los suelos, también se hace necesario establecer la relación de ésta con las propiedades del suelo y los procesos de erosión.

Para Wischmeier y Smith (1978) los autores de la ecuación universal y su correspondiente nomograma, la erosión del suelo puede ser influenciada más por la pendiente del terreno, las características de las lluvias, las coberturas y las medidas de manejo, que por las propiedades del suelo; pero los mismos autores afirman que algunos suelos se erosionan más fácilmente que otros a igual pendiente, precipitación, cobertura y medidas de manejo; esta diferencia puede ser debida a las propiedades intrínsecas de los mismos, por lo cual se debe conocer la influencia de cada propiedad en la erodabilidad de los suelos.

Bradford y Huang (1996) citados por Hincapié y Rivera (2003) establecen que la textura (granulometría), el porcentaje de materia orgánica, la densidad aparente, la densidad real, el tamaño y estabilidad de los agregados entre otras propiedades, afectan el arranque de los agregados por dispersión y por lo tanto la erodabilidad de los suelos. Aun cuando la erodabilidad de un suelo depende de la combinación de muchos más factores o propiedades físicas y químicas, es evidente que uno de los más importantes es la textura o granulometría, por su estrecha relación con la cohesión del material, volviéndolo susceptible al arranque o la dispersión. Además, según Díez (2007) el contenido de materia orgánica proporciona estabilidad a los agregados del suelo y mejora su estructura y resistencia a la erosión, siendo el segundo factor, después de la textura, determinante de la erodabilidad de un suelo.

Pero no solo las propiedades físicas son las que principalmente intervienen en los procesos de erodabilidad de los suelos, para Lal en 1981 citado por Hincapié y Rivera (2003), en cuanto a las propiedades químicas la presencia de materiales cementantes como óxidos de Fe y Al, carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4), la naturaleza de las arcillas, la capacidad de intercambio catiónico (CICE) y las propiedades que dependen de éstas, tales como permeabilidad, resistencia al corte y estabilidad estructural, afectan el desprendimiento de las partículas del suelo influyendo directamente en la erodabilidad de los mismos.

Kandiah (1979) citado por Rivera et al. (2010), reporta varias propiedades físicas, químicas y físico-químicas como factores clave que influyen en la erodabilidad del suelo. Estas propiedades incluyen densidad aparente, porosidad, permeabilidad, estructura del suelo, mineralogía de arcillas, contenido de materia orgánica, cohesión entre partículas y dispersión. No obstante, una sola característica o índice, no provee un significado satisfactorio de predicción de la erodabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en la finca El Recuerdo ubicada geográficamente entre las coordenadas 8°41'35" a 8°41'03" latitud N y 75°38'48" a 75°38'50" longitud W (Figura 1); entre los caseríos Pueblo Bonito, Buenos Aires, Campo Viejo y Campo Nuevo, al sur en la zona rural del municipio de San Carlos, en el piedemonte oeste de la sierra de Colosiná, a 18 km del casco urbano del municipio y a 43,6 km de distancia de la ciudad de Montería. Con una altitud entre 25 y 250 m y precipitaciones anuales que oscilan entre 1400 a 1600 mm (Municipio de San Carlos 2005).

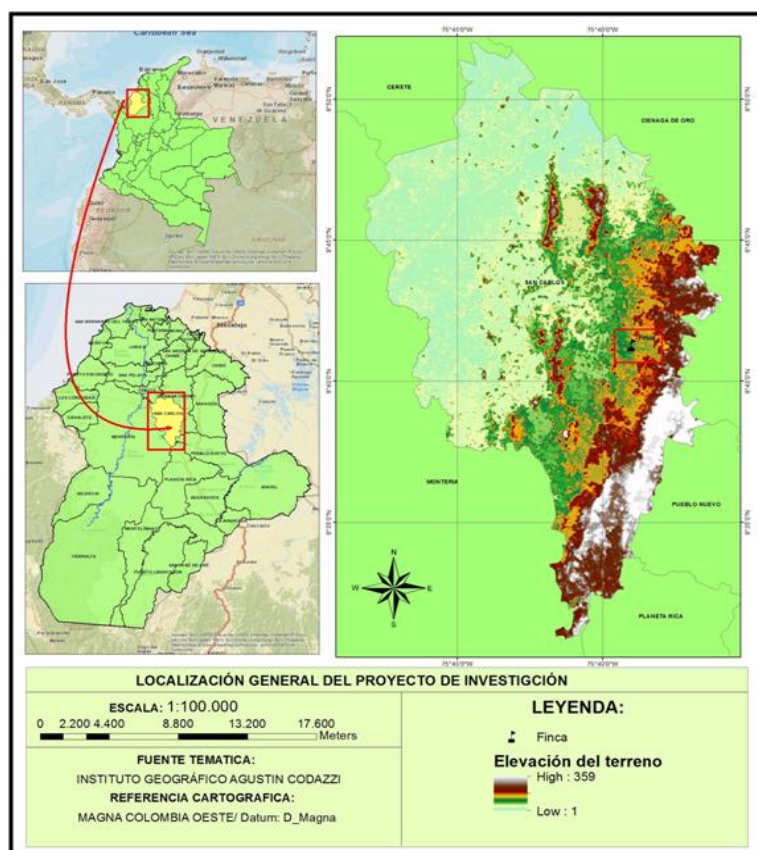


Figura 1 Localización del área de estudio
Fuente: Autores (2016), a partir de ArcGis 10.3

La finca cuenta con un área de 50 hectáreas, distribuidas en zonas de pastoreo de ganado, zonas aradas para cultivo y sembrado de pastos. En la tabla 1 se describen las cinco zonas de muestreo utilizadas para el estudio.

Tabla 1 Descripción de las zonas de muestreo

ZONA	DESCRIPCIÓN	Área (Ha)
1	Lote de pastoreo de ganado con cobertura vegetal consistente en gramas naturales y arbustos. La zona no ha sido intervenida con maquinaria agrícola desde hace 20 años, pero sí se han establecido cultivos con la ayuda de herramientas manuales.	2,2
2	Área sin intervención, esta zona se caracteriza por no presentar historial de uso agrícola desde hace 15 años aproximadamente. Su cobertura vegetal actual consiste en gramas naturales.	3
3	Área sin cobertura vegetal con pedregosidad superficial y escorrentía superficial puesto que se evidencia arrastre de material. Esta zona fue sometida a prácticas de arado con discos en el año 2015.	1,5
4	Lote de pastoreo de ganado sembrado con pasto toledo (<i>Brachiaria brizantha</i>) como especie introducida desde hace 4 años aproximadamente.	1
5	Lote con sistema silvopastoril, con especie de pasto mombasa (<i>Panicum Maximum Mombaza</i>) y árboles frutales de guayaba (<i>Psidium guajava</i>) y limón (<i>Citrus aurantifolia</i>).	0,8

Tomado de: Autores (2017)

La investigación se desarrolló en tres fases: campo, laboratorio y oficina. La fase de campo se llevó a cabo en cinco zonas de muestreo de la finca El Recuerdo (Tabla 2). La fase de laboratorio se desarrolló en el laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba y el Centro de Laboratorios de la Universidad de Sucre. Y la fase de oficina realizada simultáneamente durante toda la investigación consistió en recopilación de bibliografía, análisis de pendiente de la zona, análisis de cartografía, cálculo de los factores de erodabilidad, análisis de resultados y elaboración de documentos finales.

Según el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Córdoba (IGAC 2009), los suelos analizados se hallan en posición geomorfológica de lomas y colinas con pendientes entre 3 y 50% como lo muestra la tabla 2, en un clima cálido seco y relieve de ligeramente ondulado a ligeramente escarpado. Son suelos superficiales a moderadamente profundos, derivados de lodolitas, arcillolitas y areniscas conglomeráticas; de texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, con

gravilla localizada, drenaje natural de moderado a excesivo, fertilidad alta a moderada y erosión ligera a severa.

Tabla 2 Ubicación geográfica de las zonas de muestreo y grados de pendientes

Zonas de Muestreo	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Pendiente (%)	Grado de Pendientes
1	8° 41' 30,8" N	75° 39' 19,1" W	62	17,2	Muy inclinado
2	8° 41' 32,2" N	75° 39' 04" W	98	27,76	Moderadamente Escarpado
3	8° 41' 31,0" N	75° 38' 53,6 W	94	23,53	Muy Inclinado
4	8° 41' 14,1" N	75° 38' 54,6" W	70	13,5	Muy inclinado
5	8° 41' 08,6" N	75° 38' 54,2" W	63	20,9	Muy inclinado

Tomado de: Autores (2017); IGAC (1995)

2.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

Para la recolección de muestras se identificó el área de estudio por medio de un recorrido en campo, y se escogieron cinco (5) zonas con suelos de diferente uso. En cada zona de muestreo se realizó la descripción del perfil de suelo detallando características físicas de cada horizonte que lo conforma, se realizaron las mediciones para el cálculo de la pendiente y se diagnosticó directamente en campo la permeabilidad del suelo (en cm h^{-1}) mediante el método del pozo barrenado invertido o de Porchet (Jiménez y Rodríguez 2008).

Se tomaron tres muestras de aproximadamente un kilogramo de suelo, compuesta por tres submuestras recolectadas alrededor del mismo punto a una profundidad de 0 – 10 cm, manteniendo el mismo nivel de altura. Las muestras fueron empacadas en bolsas plásticas herméticamente selladas y marcadas, se llevaron al laboratorio de suelos y aguas de la Universidad de Córdoba y al centro de laboratorios de la Universidad de Sucre, con el fin de realizar la determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo. El total de muestras enviadas a los laboratorios fue de quince (15), tres por cada zona de estudio; para tener al menos dos grados de libertad en la estimación de los datos promedio de las variables estudiadas.

Los análisis de laboratorio realizados a cada muestra se enumeran en la tabla 3.

Tabla 3 Análisis de laboratorio realizados a cada muestra de suelo

<i>Propiedades Física / Química</i>	<i>Método de Análisis en Laboratorio</i>
Granulometría (Porcentaje de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar))	Método de Bouyoucos.
Porcentaje de Materia orgánica del suelo	Método de Walkley y Black
Densidad Real (Dr)	Método del Picnómetro
Densidad Aparente (Da)	Método del terrón parafinado
Estabilidad de Agregados	Método de Yoder
Humedad Gravimétrica (Φ)	Método Gravimétrico
pH	Método del potenciómetro (1:1)
Bases: K, Ca, Mg, Na	Extracción con Acetato de Amonio 1.0 M y Espectrofotometría de Absorción Atómica
Al	Extracción con KCL 1.0 M y luego titulación volumétrica
P	Método de Bray II, luego espectroscopia UV-VIS
Granulometría de Arenas	Tamizado con lavado
CICE	Extracción con Acetato de Amonio 1.0 M, luego cuantificación por suma de cationes

Tomado de: Autores (2017)

2.3 MÉTODOS PARA CALCULAR EL FACTOR DE ERODABILIDAD (K) DEL SUELO

Para el cálculo del factor erodabilidad (K), se utilizaron los siguientes métodos:

El primer método utilizado fue el propuesto por Wischmeier y Smith (1960), donde la erodabilidad se estima de manera indirecta a través de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{2,1 L + Amf \times 100 - Ar^{1,14} \left[10^{-4} \right]^{12-a} + 3,25 b - 2 + 2,5 c - 3}{100} \quad Ec.2.$$

En donde:

- K: Factor de erodabilidad en $t\ ha\ h\ tm^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$
- L: % de limo (0,002-0,05 mm) según USDA, anexo 1.
- Amf: % de arena muy fina (0,1-0,05 mm) según USDA, anexo 1.
- Ar: % de arcilla (< 0,002 mm) según USDA, anexo 1.
- a: % de materia orgánica (M.O)
- b: Calificación de la estructura
- c: Calificación de la permeabilidad

El segundo método fue el propuesto por Paulet (1973), en el cual la erodabilidad se estima de manera indirecta empleando la siguiente ecuación:

$$K = 0,010356 - 0,00378082A + 0,00232882L + 0,323545Da \quad Ec.3.$$

En donde:

- K: Factor de erodabilidad en $t\ ha\ h\ tm^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$
- A: % de arena (1,0 – 0,5 mm) según USDA, anexo 1.
- L: % de limo (0,002-0,05 mm) según USDA, anexo 1.
- Da: densidad aparente en $g\ cm^{-3}$

El tercer método que se utilizó fue el nomograma también propuesto por Wischmeier y Smith (1960). En éste se comienza ingresando con el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo (Anexo 6), a partir de este valor, se proyecta una línea recta hasta interceptar la correspondiente curva representativa del porcentaje de arena total del suelo analizado. Desde ese punto de corte, se proyecta la línea paralela al eje Y hasta tocar con la curva que representa el porcentaje de materia orgánica. Desde allí se continua hacia la derecha paralelo al eje X, cruzando la primera aproximación del valor K, el cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura y permeabilidad. De esta manera, se ingresa al gráfico derecho, continuando la proyección realizada hasta interceptar la línea correspondiente al código por estructura del suelo en cuestión. Desde ese punto, se desciende paralelo al eje Y por el gráfico hasta topar la línea que representa el código por permeabilidad del suelo en estudio. Finalmente, desde ese punto se traza la línea recta en dirección al eje X hacia la izquierda del gráfico, hasta encontrar el factor correspondiente de erodabilidad del suelo (K) sobre el eje Y. El resultado obtenido para

cada punto, fue multiplicado por un factor de conversión con el propósito de obtener el factor K en las unidades del Sistema Internacional (Santos y Gonzáles 1999).

2.4 CLASIFICACIÓN DEL FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO

Para determinar el grado de erodabilidad que presenta cada zona utilizada en el estudio, se clasificaron los valores de K obtenidos a través de los diferentes métodos, utilizando la tabla 4, propuesta por el USDA (1962) citada por Santos y González (1999).

Tabla 4 Clasificación de los grados de erodabilidad según USDA (1962)

VALOR DE K (t acre h tp ⁻¹ acre ⁻¹ pg ⁻¹)	VALOR DE K (t ha h tm ⁻¹ mm ⁻¹ ha ⁻¹)	CLASIFICACIÓN
< 0,06	< 0,0775	Muy poco Erodable
0,06 – 0,13	0,0775 – 0,1680	Débilmente Erodable
0,13 – 0,25	0,1680 – 0,3230	Moderadamente Erodable
0,25 – 0,52	0,3230 – 0,6784	Fuertemente Erodable
0,52 – 0,78	0,6784 - 1	Extremadamente Erodable

Tomado de: Santos y González (1999)

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se calcularon los promedios para los valores del factor erodabilidad (K), determinados a partir de los diferentes métodos propuestos, esta información se digitó en matrices en EXCEL al igual que la estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas estudiadas.

Se implementó un diseño completamente al azar con tres repeticiones en arreglo factorial 5x3, donde el primer factor correspondió a las zonas (pastoreo de ganado, vegetación nativa, agrícola recién arado, agrícola solo pasto y sistema silvopastoril) y el segundo a la erodabilidad obtenida por los tres métodos. Los datos fueron analizados con el programa System Analysis Statics – SAS (Versión 9.1).

Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a las propiedades físicas y químicas y a los valores de erodabilidad calculados. Se correlacionaron las propiedades físicas y químicas entre sí y con los factores de erodabilidad, empleando el coeficiente de correlación de Spearman, utilizando los rangos de cada variable arrojados por el programa; debido a que la mayoría de las variables analizadas no pasaron el test de normalidad. Finalmente, para establecer e ilustrar mejor las relaciones entre las variables físicas y químicas del suelo frente a los factores de erodabilidad en cada zona, se realizó un análisis multivariado mediante un análisis de componentes principales (ACP), empleando el programa Statgraphics Centurion versión XV.I.

2.6 PLANTEAMIENTO DE PRÁCTICAS DE MANEJO DE SUELOS

A partir de los resultados obtenidos en las fases anteriores, relacionados con los valores del factor K y el análisis de las diferentes propiedades físicas y químicas del suelo, así como el respectivo diagnóstico de las condiciones naturales del terreno, se procedió a investigar y plantear las prácticas de manejo que podrían aplicarse al recurso suelo en la zona de estudio; priorizando en las áreas que presentaron valores mayores del factor erodabilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la descripción de perfiles de suelos realizada en la fase de campo de la investigación se evidencian que las texturas analizadas en campo varían de franco arcillosas (FAR) a franco arcilloarenosas (FARa) hasta llegar a texturas francas (F), con presencia de gravilla y pedregosidad en casi todos los perfiles de suelos analizados (Anexo 5).

Para la metodología USLE el grado y la longitud de la pendiente del suelo son un factor importante en las pérdidas del material. El valor máximo permisible establecido por el USDA (1960) es de $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ lo que representa un serio problema para zonas con altas pendientes, ya que sumado a los altos valores de erodabilidad del suelo pueden acarrear grandes pérdidas del recurso. En las zonas de estudio analizadas la mayor pendiente medida fue de 27,7% (zona número 2), la cual se cataloga como moderadamente escarpada según el IGAC (1995), el resto de zonas estudiadas se clasificaron como muy inclinadas, con pendientes entre 12% a 25% como se evidencia en la tabla 2.

3.1 CÁLCULO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD (K) DEL SUELO A TRAVÉS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS PROPUESTOS

3.1.1 Método 1: Ecuación de Wischmeier y Smith

Con los valores porcentuales de arena muy fina, limo, arcilla, materia orgánica (Anexo 8) y los códigos de la estructura y la permeabilidad del suelo (Anexos 2 y 3) en cada una de las 5 zonas de estudio, se obtuvo el factor de erodabilidad – K_1 (Tabla 5) mediante la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1960).

Tabla 5 Factor K_1 - Erodabilidad método de la ecuación de Wischmeier y Smith

ZONAS	FACTOR K_1 – ERODABILIDAD ($\text{t ha h tm}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)	CLASIFICACIÓN SEGÚN USDA (1962)
1	0,3119	Moderadamente Erodable
2	0,1572	Débilmente Erodable
3	0,2076	Moderadamente Erodable
4	0,2755	Moderadamente Erodable
5	0,3843	Fuertemente Erodable

Tomado de: Autores (2017)

3.1.2 Método 2: Ecuación de Paulet

Con los valores porcentuales de arena y limo, más los valores de densidad aparente en g.cm^{-3} (Anexo 8) en cada uno de las 5 zonas de estudio, se obtuvo el factor de erodabilidad – K_2 (Tabla 6) mediante la ecuación propuesta por Paulet (1967).

Tabla 6 Factor K_2 - Erodabilidad método de Paulet

ZONAS	FACTOR K_2 - ERODABILIDAD ($\text{t.ha.h.tm}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$)	CLASIFICACIÓN SEGÚN USDA (1962)
1	0,4552	Fuertemente Erodable
2	0,4915	Fuertemente Erodable
3	0,5657	Fuertemente Erodable
4	0,4980	Fuertemente Erodable
5	0,5083	Fuertemente Erodable

Tomado de: Autores (2017)

3.1.3 Método 3: Nomograma de Wischmeier y Smith

Con los valores porcentuales de arena muy fina, limo, materia orgánica (Anexo 8) y los códigos de la estructura y la permeabilidad del suelo (Anexos 2 y 3) en cada una de las 5 zonas de estudio, se obtuvo el factor de erodabilidad – K_3 (Tabla 7) mediante el nomograma propuesto por Wischmeier y Smith, (1960).

Tabla 7 Factor K_3 - Erodabilidad método nomograma de Wischmeier y Smith

ZONAS	FACTOR K_3 - ERODABILIDAD ($\text{t.ha.h.tm}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$)	CLASIFICACIÓN SEGÚN USDA (1962)
1	0,3402	Fuertemente Erodable
2	0,1766	Moderadamente Erodable
3	0,2153	Moderadamente Erodable
4	0,2972	Moderadamente Erodable
5	0,4177	Fuertemente Erodable

Tomado de: Autores (2017)

Los valores de las propiedades físicas y químicas que se mencionan a lo largo de todo el informe pueden ser verificados en los anexos 4, 5 y 8.

A partir de los resultados obtenidos a través de la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith (Tablas 5 y 7), se tiene que los valores del factor K_1 y K_3 varían de 0,1572 a 0,3843 y de 0,1766 a 0,4177 $\text{t ha h tm}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$ respectivamente.

Según estos métodos, los valores más altos del factor K se presentan en la zona de muestreo número 5, por lo cual se concluye que los suelos de esta área son los más susceptibles a los procesos de erosión, debido a la inestabilidad estructural que presentan ($DPM < 0,5$ mm), a sus moderados valores de materia orgánica y altas concentraciones de Sodio (Na); este último considerado precursor de dispersión en el suelo (Otero et al. 2012). Además, es un área sometida a constante pisoteo de ganado, ocasionando un deterioro en la estructura del suelo, por compactación del mismo.

Para la zona de muestreo número 2 se obtuvieron los valores más bajos de erodabilidad, debido a que esta área presentó los porcentajes más altos de materia orgánica entre las muestras analizadas y permanece constantemente con abundante cobertura vegetal (vegetación nativa; gramas), ya que las cubiertas vegetales disminuyen la capacidad o potencial erosivo de la lluvia y reducen la erodabilidad de los suelos (Chaney y Swift 1984; Manzanarez et al. 2001). En el estudio realizado por Martínez y Hernández (2009) en el departamento de Boaco – Nicaragua, se comprobó por medio de la USLE que los periodos de mayor riesgo erosivo son aquellos cuando los cultivos presentan una menor cobertura vegetal. A su vez, hallaron que las parcelas de suelos donde se evidencia mayor porcentaje de materia orgánica presentan una menor erodabilidad con respecto a las demás, debido a que la materia orgánica hace que las partículas de suelo, los poros y sus agregados estén más adheridos y esto permite que el suelo sea más resistente a la erosividad de la lluvia.

Aunque en la zona número 2 la erodabilidad es baja en comparación con las demás, no implica que necesariamente sea resistente a la erosión, ya que su susceptibilidad continúa siendo alta, debido principalmente a su mayor pendiente en comparación con las otras zonas, por tanto, no se le puede dar un uso y manejo intensivo con azadón o maquinaria agrícola que conlleve a la remoción del suelo y destrucción de sus agregados naturales, sino que por el contrario, se le debe dar un uso y manejo racional, con prácticas preventivas de conservación de suelos en forma intensiva (Rivera 1999).

Al realizar la comparación entre la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith, se tiene que las variaciones en los resultados obtenidos para K_1 y K_3 son muy pequeñas, pero se mantiene la misma secuencia, ya que como se evidencia en las tablas 5 y 7 los

valores más bajos de erodabilidad se obtuvieron para la zona de muestreo número 2 y los más altos para la zona de muestreo número 5.

Según el método de Paulet (1967), los valores de la erodabilidad oscilaron entre 0,4552 y 0,5657 t ha h tm^{-1} mm^{-1} ha^{-1} , los cuales son calificados como fuertemente erodables por el USDA (1962). Estos valores difieren notablemente de los obtenidos en los dos métodos anteriores ya que la ecuación de Paulet no incorpora la totalidad de las variables utilizadas por Wischmeier y Smith para el cálculo del factor K. Incluye además la densidad aparente como una nueva variable en su ecuación, obteniéndose valores más altos de K como consecuencia de los moderados y altos valores de densidad aparente que presentaron los suelos analizados (Anexo 8). Los estudios realizados por Rivera et al. (2010) en suelos de la zona cafetera colombiana demuestran que entre más alto sea el valor de la densidad aparente, mayor será el valor de la erodabilidad de los suelos, y así mismo su susceptibilidad a la erosión, ya que se disminuye la infiltración y se aumenta la escorrentía sobre los suelos.

Los métodos de Wischmeier y Smith no tienen en cuenta la densidad aparente del suelo al momento de calcular el factor de erodabilidad, esta variable está íntimamente ligada a otras variables como la materia orgánica y el manejo que recibe el recurso. Salamanca y Sadeghian (2005), en la zona cafetera de Colombia demostraron que suelos con menores porcentajes de materia orgánica y altos valores de densidad aparente evidencian mayor compactación por el pisoteo del ganado, condición que aumenta los riesgos de erosión.

En el gráfico 1 se representa la variación de los factores de erodabilidad de acuerdo a cada método utilizado y la zona de muestreo. Los rangos de erodabilidad obtenidos en este estudio son similares a los calculados por Santos y Gonzáles (1999) en la cuenca alta del río Bogotá, en donde también se utilizaron los métodos indirectos de Paulet y Wischmeier y Smith para clasificar la zona estudiada de acuerdo al grado de susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. En este estudio y en el citado anteriormente se tiene que los resultados obtenidos por el método de Paulet representan valores mayores de erodabilidad con respecto a los obtenidos por los métodos Wischmeier y Smith, lo cual puede deberse a que las condiciones físicas y ambientales en las cuales fue desarrollado el método son diferentes a las presentes, tanto en la cuenca

alta del río Bogotá como en la zona rural del municipio de San Carlos; por lo que se infiere que el método de Paulet no sería aplicable a estos suelos.

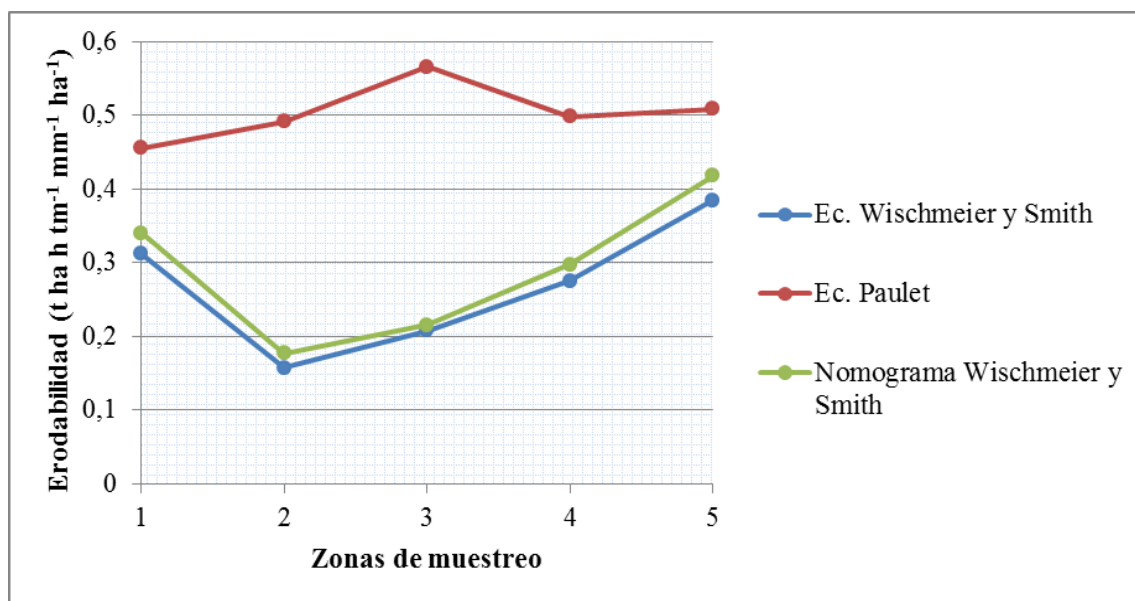


Gráfico 1 Valores de erodabilidad obtenidos por los métodos de Paulet y Wischmeier y Smith para las zonas estudiadas
Tomado de: Autores (2017)

3.1.4 Análisis de datos

* Estadística descriptiva de las variables físicas y químicas

Con la muestra seleccionada se realizó un análisis descriptivo a las propiedades físicas y químicas estudiadas (Tabla 8 y 9), con el fin de mirar la distribución de los datos, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 8 Estadística descriptiva para las propiedades físicas de las zonas analizadas

PROPIEDADES FÍSICAS										
		GRANULOMETRÍA				Da	Dr	Hum	DPM	DGM
ZONA		%A	%Ar	%L	%Amf	g cm^{-3}		%	mm	
1	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	41,60	30,00	28,43	5,18	1,56	2,53	22,57	1,65	-0,70
	Mín	28,30	28,30	11,80	4,90	1,46	2,51	19,10	1,33	-0,99
	Máx	59,90	31,70	40,10	5,55	1,67	2,54	25,50	1,84	-0,50
	Desv. Est	16,38	1,70	14,79	0,33	0,11	0,02	3,23	0,28	0,26
	CV (%)	39,38	5,67	52,01	6,42	6,81	0,60	14,33	16,79	-36,73
2	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	43,27	37,23	19,53	1,68	1,49	2,56	36,33	1,03	-1,52
	Mín	41,60	36,70	18,40	1,45	1,27	2,51	33,00	0,52	-1,86
	Máx	44,90	38,30	20,10	2,15	1,60	2,65	39,50	1,43	-1,27
	Desv. Est	1,65	0,92	0,98	0,40	0,19	0,08	3,25	0,47	0,31
	CV (%)	3,81	2,48	5,02	24,01	12,79	3,05	8,95	45,10	-20,22
3	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	41,03	40,57	18,40	2,08	1,65	2,54	34,30	1,41	-1,06
	Mín	39,90	40,00	18,40	2,05	1,59	2,52	30,90	1,13	-1,45
	Máx	41,60	41,70	18,40	2,10	1,75	2,56	38,10	1,76	-0,77
	Desv. Est	0,98	0,98	0,00	0,03	0,09	0,02	3,62	0,32	0,35
	CV (%)	2,39	2,42	0,00	1,39	5,44	0,82	10,54	22,75	-32,87
4	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	59,37	21,13	19,53	4,38	1,69	2,56	20,90	1,41	-0,96
	Mín	58,30	20,00	18,40	4,10	1,62	2,52	18,00	1,13	-1,45
	Máx	59,90	21,70	20,10	4,95	1,80	2,64	22,60	1,77	-0,50
	Desv. Est	0,92	0,98	0,98	0,49	0,09	0,07	2,52	0,33	0,48
	CV (%)	1,56	4,64	5,02	11,20	5,58	2,60	12,08	23,08	-49,35
5	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	46,03	21,67	32,30	7,27	1,47	2,59	23,07	-0,19	-2,84
	Mín	43,30	20,00	28,40	5,70	1,36	2,53	21,00	-1,54	-4,44
	Máx	49,90	23,30	35,10	8,90	1,55	2,65	25,70	1,85	-0,60
	Desv. Est	3,44	1,65	3,48	1,60	0,10	0,06	2,40	1,80	2,00
	CV (%)	7,48	7,62	10,78	22,03	6,70	2,33	10,41	-945,92	-70,3

Tomado de: Autores (2017)

Tabla 9 Estadística descriptiva para las propiedades químicas de las zonas analizadas

		PROPIEDADES QUÍMICAS								
		pH	M.O	S	P	Ca	Mg	K	Na	CICe
ZONAS		%		mg/kg		cmol*/kg				
1	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	5,72	1,61	14,17	3,43	5,27	11,27	0,20	0,17	16,90
	Mín	5,65	1,27	12,50	2,30	3,90	5,40	0,12	0,15	9,60
	Máx	5,81	1,88	17,40	5,50	6,60	16,30	0,30	0,22	23,20
	Desv. Est	0,08	0,31	2,80	1,79	1,35	5,50	0,09	0,04	6,85
	CV (%)	1,46	19,31	19,77	52,21	25,64	48,80	47,25	23,32	40,56
2	n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	6,72	2,63	18,17	4,10	9,47	35,73	0,22	0,08	45,53
	Mín	6,53	2,29	14,80	3,40	7,90	32,60	0,17	0,04	40,80
	Máx	6,85	2,97	24,10	4,80	11,30	37,70	0,26	0,11	48,60
	Desv. Est	0,17	0,34	5,15	0,70	1,72	2,74	0,05	0,04	4,16
	CV (%)	2,53	12,91	28,37	17,07	18,12	7,68	21,16	45,07	9,13
3	N	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	6,81	1,77	12,93	8,17	8,20	35,17	0,17	0,11	43,70
	Mín	6,77	1,27	12,50	4,50	7,60	30,10	0,15	0,07	38,80
	Máx	6,86	2,10	13,70	14,90	8,60	38,60	0,18	0,17	46,60
	Desv. Est	0,05	0,44	0,67	5,84	0,53	4,48	0,02	0,05	4,27
	CV (%)	0,67	24,88	5,15	71,50	6,45	12,74	10,19	48,10	9,77
4	N	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	6,33	1,18	14,13	8,33	8,87	4,63	0,17	0,05	13,73
	Mín	6,00	0,76	13,20	2,50	7,60	4,20	0,10	0,02	12,40
	Máx	6,94	1,53	15,50	19,80	11,20	5,00	0,27	0,09	15,80
	Desv. Est	0,53	0,39	1,21	9,93	2,02	0,40	0,09	0,04	1,81
	CV (%)	8,31	33,02	8,56	119,17	22,82	8,72	52,28	72,11	13,21
5	N	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Prom	6,35	1,65	12,87	3,07	7,07	6,97	0,11	0,22	14,37
	Mín	6,28	1,28	11,70	2,10	6,00	6,30	0,08	0,00	12,40
	Máx	6,47	1,96	14,40	4,80	8,20	7,50	0,15	0,50	15,90
	Desv. Est	0,10	0,34	1,39	1,50	1,10	0,61	0,04	0,25	1,79
	CV (%)	1,61	20,85	10,78	49,06	15,59	8,77	32,78	113,83	12,46

Tomado de: Autores (2017).

Del libro Fundamentos Estadísticos para las Finanzas de Rojas (2000), Editorial Andina, se tomó la tabla 10, para determinar la homogeneidad o heterogeneidad de los datos.

Tabla 10 Variabilidad de los datos

Si $0 \leq CV(x) \leq 25\%$	La variable es homogénea
$25\% \leq CV(x) < 50\%$	La variable es poco homogénea
$50\% \leq CV(x)$	La variable es heterogénea

Tomado de: Rojas (2000)

Las tablas 8 y 9, resumen la estadística descriptiva para el conjunto de variables analizadas en el estudio, la única variable física que demostró una heterogeneidad fue el limo, en la zona número 1, con un CV de 52,01% según lo establecido en la tabla 10. Para las propiedades químicas el contenido de P presentó altos porcentajes de CV con valores de 52,21%, 71,50% y 119,17% para las zonas 1, 3 y 4. El alto CV del P concuerda con varios estudios reportados en la literatura que establecen incluso valores superiores al 100 % (León et al. 1999; Sadeghian et al. 2001; Jaramillo 2002; Silva et al. 2003, citados por Obando et al. 2006).

El Na también presentó valores heterogéneos para la zona 4 y 5 con CV de 72,11% y 113,83%, en compañía del K para la zona 4 (CV de 52,28%). De manera general, las variables físicas y químicas no mostraron tanta variabilidad en sus valores, calificándolas como homogéneas y poco homogéneas según la tabla 10. Estos resultados muestran que tanto el rango como el coeficiente de variación son parámetros que permiten una visión general de la variabilidad de atributos del suelo.

*** Análisis de Varianza**

Se realizó un análisis de varianza (Tabla 11) para determinar la respuesta de los valores de erodabilidad en función de la zona y el método de determinación. En vista de que los datos obtenidos corresponden a variables derivadas, no se cumplieron los supuestos del análisis de varianza, y después de realizar las transformaciones correspondientes (Logarítmica, raíz cuadrada y arc coseno) éstas aún no se ajustaron a dicha condición, por lo tanto se realizaron estadísticas no paramétricas, utilizando los rangos.

El análisis de varianza de la tabla 11 reporta que la erodabilidad fue influenciada significativamente ($p \leq 0,01$) por los efectos del tipo de zona, tipo de método de determinación y la interacción entre estos. En la interacción del análisis de varianza se

realizó una tabla de doble entrada para analizar la respuesta de los valores medios de rangos de los métodos de erodabilidad en las diferentes zonas. Esta prueba se realizó con el test diferencia mínima significativa – DMS ($p=0,05$).

Tabla 11 Análisis de varianza de la respuesta de los rangos de erodabilidad en función de la zona y el método de determinación

Fuente de variación	gl	SC	CM	Fc	Pr > F
Zona	4	1396,66	349,17	16,84**	< 0,0001
Método	2	4723,33	2361,67	113,88**	< 0,0001
(Zona x Método)	8	845,33	105,67	5,10**	0,0005
Error	30	622,17	20,74		
Total	44	7587,50			
R ²	0,9180				
CV (%)	19,8				

gl: Grados de libertad; R²: Coeficiente de determinación; CV: Coeficiente de variación;

**.: diferencias significativas al 1%

Tomado de: Autores (2017)

Al igual que los resultados de esta investigación, Velásquez et al. (2007) aseguran que la asociación de las actividades antrópicas (Manejo y usos del suelo), presentan una alta relación con el potencial de los suelos a degradarse, bien sea por condiciones naturales o por la realización de prácticas inadecuadas en el manejo del suelo y el agua (Cultivos limpios, siembras a favor de la pendiente, deforestación), lo que confirma que la relación entre las zonas de estudio y la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica calculada por los tres métodos propuestos sea significativa.

En el análisis de la interacción zona*método de la tabla 12, se confirma que el método de Paulet tiende a sobreestimar los valores del factor K en cada una de las zonas estudiadas en comparación con los otros dos métodos, los cuales fueron similares estadísticamente. Estos resultados concuerdan con los hallados por Santos y González (1999) en suelos de la cuenca alta del río Bogotá al norte del departamento de Cundinamarca, donde se evidenció la tendencia por parte del método de Paulet a sobreestimar el rango de erodabilidad con respecto a los calculados por los métodos de Wischmeier y Smith.

Tabla 12 Valores medios de los rangos de la respuesta de la erodabilidad del suelo en función de la zona y el método de determinación

Zonas	Método		
	Ecuación de Wischmeier y Smith	Ecuación de Paulet	Nomograma de Wischmeier y Smith
1. Pastoreo ganado	21,00 b	31,00 a	22,00 b
2. Vegetación nativa	2,00 c	27,00 a	5,50 b
3. Agrícola recién arada	7,00 b	40,00 a	8,00 b
4. Agrícola solo pasto	16,00 c	35,00 a	19,00 b
5. Sistema silvopastoril	26,00 b	38,00 a	37,00 a

Letras similares en sentido horizontal no difieren estadísticamente, según la prueba DMS ($p=0,05$).

Tomado de: Autores (2017)

3.2 CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO CON LOS FACTORES DE ERODABILIDAD (K)

Para la correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo con los factores de erodabilidad hallados a través de los tres métodos, se tuvo en cuenta la siguiente tabla de rangos para determinar el grado de asociación de las variables:

Tabla 13 Rangos para el grado de correlación

Valores de r	Tipo y grado de Correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0,8$	Negativa fuerte
$-0,8 < r < -0,5$	Negativa moderada
$-0,5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0,5$	Positiva débil
$0,5 < r < 0,8$	Positiva moderada
$0,8 \leq r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Tomado de: Levine (2006)

3.2.1 Análisis de correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo

De los resultados obtenidos (Tabla 14), se tiene que los casos más sobresalientes de acuerdo al análisis son: la relación negativa moderada que se presenta entre las variables arcilla y arena, con $r=-0,69$; la relación negativa moderada entre arcilla y arena muy fina, ($r=-0,70$) y la relación entre la humedad gravimétrica con la arena muy fina ($r=-0,71$) y la arena ($r=-0,61$).

La correlación negativa entre dos variables indica que cuando el valor de una aumenta, el valor de la otra disminuye; por el contrario las que presentan correlación positiva, varían en la misma dirección.

Tabla 14 Correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo

	A	Ar	L	Amf	Da	Dr	Hum	DPM	DGM
A	1,00								
Ar	-0,69* 0,004	1,00							
L	-0,31 0,252	-0,42 0,118	1,00						
Amf	0,30 0,276	-0,70** 0,003	0,50* 0,050	1,00					
Da	0,04 0,898	0,07 0,808	-0,22 0,432	-0,34 0,215	1,00				
Dr	0,15 0,587	-0,20 0,470	0,09 0,760	0,06 0,840	0,04 0,893	1,00			
Hum	-0,61* 0,015	0,84** <0,0001	-0,22 0,430	-0,71** 0,003	0,08 0,770	-0,13 0,645	1,00		
DPM	-0,20 0,465	-0,12 0,657	0,23 0,405	0,03 0,922	-0,13 0,646	-0,30 0,279	-0,32 0,241	1,00	
DGM	-0,12 0,658	-0,16 0,568	0,15 0,596	0,04 0,886	0,08 0,775	-0,27 0,321	-0,41 0,124	0,95** <0,0001	1,00

*: Nivel de significancia al 5%; **: Nivel de significancia al 1%

Tomado de: Autores (2017)

El análisis también permite apreciar la relación positiva fuerte entre la humedad y la arcilla, con un valor de correlación ($r:0,84$), esta relación entre el contenido de arcilla y humedad del suelo se debe a que las partículas de arcilla, tienen una mayor capacidad de retención y almacenamiento de agua en comparación con los limos y las arenas, esto debido principalmente a su menor tamaño, la mayor superficie específica de reacción y a la mayor cantidad de microporos por centímetro cúbico que forman dentro del suelo (Largaespada y Henríquez 2015).

Otro dato importante es la relación entre arena muy fina y limo con una relación positiva moderada ($r:0,50$), lo que confirma lo expuesto por Lal (1988) que las arenas muy finas se comportan de manera muy similar al limo. El DMP por su parte, presentó una correlación positiva fuerte con el DGM ($r:0,95$), puesto que ambas propiedades son muy influyentes en la estabilidad estructural del suelo.

3.2.2 Análisis de correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo

En la tabla 15 se muestran los valores de la correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo. Después de realizar el análisis entre las variables químicas, los resultados más representativos son: la relación entre el pH y propiedades como Ca y CICE, con valores de correlación (r) de 0,80 y 0,61 respectivamente. Una correlación equivalente se evidenció en el estudio realizado por Obando et al. (2006) en una granja experimental de la Universidad de Caldas, ubicada en el piedemonte coluvial de la Cordillera Central Colombiana, donde estas propiedades presentaron una correlación altamente significativa.

La M.O presentó una correlación positiva moderada con el Mg y la CICE ($r:0,59$ y $r:0,67$ respectivamente), por su parte el Mg y la CICE se correlacionaron fuertemente con un $r:0,90$. Estas correlaciones se deben a que las partículas de materia orgánica están cargadas negativamente y atraen cationes como el magnesio aumentando la capacidad de intercambio del suelo (Luciano 2014).

Tabla 15 Correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo

	pH	M.O	S	P	Ca	Mg	K	Na	CICe
pH	1,00								
M.O	0,39	1,00							
	0,153								
S	0,24	0,35	1,00						
	0,395	0,194							
P	0,58*	0,09	0,33	1,00					
	0,024	0,734	0,233						
Ca	0,80**	0,51	0,24	0,37	1,00				
	0,0004	0,053	0,396	0,168					
Mg	0,44	0,59*	0,19	0,34	0,30	1,00			
	0,101	0,021	0,497	0,209	0,280				
K	0,36	0,40	0,54*	0,79**	0,34	0,40	1,00		
	0,192	0,142	0,037	0,0005	0,209	0,136			
Na	-0,10	0,14	-0,35	0,16	-0,08	0,18	0,12	1,00	
	0,721	0,611	0,198	0,577	0,767	0,509	0,659		
CICe	0,61*	0,67*	0,34	0,50	0,62*	0,90**	0,60*	0,17	1,00
	0,015	0,006	0,207	0,060	0,014	<0,0001	0,017	0,553	

*: Nivel de significancia al 5%; **: Nivel de significancia al 1%

Tomado de: Autores (2017)

3.2.3 Análisis de correlación (r) entre las propiedades físicas y químicas del suelo

Se realizó la correlación entre las propiedades físicas y químicas del suelo como se ilustra en la tabla 16. Los datos más sobresalientes de la tabla corresponden a:

La fuerte correlación positiva de la CICe con la arcilla y la humedad gravimétrica (r: 0,84 y 0,95, respectivamente), y su correlación negativa con la arena muy fina (r: -0,75) y con la arena (r:-0,64), puesto que las arcillas tienen la propiedad de adsorber e intercambiar con la solución acuosa los nutrientes minerales que se encuentran disueltos

en forma iónica, como consecuencia de la carga eléctrica existente en la superficie de estas partículas pequeñas, y a su vez almacenar mayor humedad en los poros. Las arenas al no presentar este tipo de carga no atraen los iones positivos razón por la cual su correlación con la CICE es negativa (Ansorena 1995).

La relación positiva entre la materia orgánica y la humedad gravimétrica con valores de correlación de 0,69; el estudio realizado por Lopez et al. (2001) comprobó que un alto contenido de materia orgánica disminuye la densidad aparente, incrementa la porosidad y modifica la estructura al mejorar la formación de agregados, todo ello influye en un aumento en la retención de humedad del suelo.

Tabla 16 Correlación (r) entre las propiedades físicas y químicas del suelo

	pH	M.O	S	P	Ca	Mg	K	Na	CICE
A	-0,07 0,813	-0,42 0,115	-0,14 0,606	-0,28 0,310	0,05 0,868	-0,72** 0,002	-0,37 0,175	-0,35 0,195	-0,64** 0,009
Ar	0,44 0,102	0,50 0,059	0,08 0,773	0,46 0,083	0,35 0,201	0,88** <0,0001	0,50 0,058	0,22 0,420	0,84** <0,0001
L	-0,43 0,111	0,04 0,886	0,07 0,806	-0,36 0,192	-0,40 0,144	-0,15 0,601	-0,25 0,365	0,11 0,704	-0,20 0,472
Amf	-0,53* 0,043	-0,42 0,119	-0,46 0,081	-0,43 0,109	-0,61* 0,015	-0,65** 0,009	-0,46 0,080	0,27 0,317	-0,75** 0,001
Da	0,21 0,441	-0,28 0,319	-0,11 0,692	0,05 0,849	0,42 0,116	-0,12 0,675	-0,06 0,823	-0,15 0,599	0,10 0,717
Dr	-0,02 0,954	0,01 0,964	-0,16 0,555	-0,32 0,249	0,04 0,883	-0,16 0,572	-0,64* 0,010	0,12 0,680	-0,24 0,385
Hum	0,56* 0,031	0,69** 0,004	0,21 0,448	0,38 0,161	0,60* 0,017	0,89** <0,0001	0,48 0,071	0,21 0,440	0,95** <0,0001
DPM	-0,28 0,317	-0,15 0,592	0,41 0,124	-0,03 0,909	-0,49 0,067	-0,11 0,689	0,16 0,565	-0,71** 0,002	-0,18 0,525
DGM	-0,28 0,314	-0,30 0,273	0,29 0,298	-0,03 0,909	-0,44 0,097	-0,21 0,458	0,10 0,709	-0,72** 0,002	-0,23 0,398

*: Nivel de significancia al 5%; **: Nivel de significancia al 1%

Tomado de: Autores (2017)

El Na presentó una relación negativa moderada altamente significativa con el DPM y el DGM con r:-0,71 y r:-0,72 respectivamente, lo cual indica que a mayor contenido de Na en el suelo la estabilidad estructural de estos disminuye (< DPM y DGM), debido a que

el Na es considerado como precursor de dispersión y desfloculación, por su alto radio de hidratación (Otero et al. 2012).

El Mg se correlaciono de manera negativa con la arena ($r:-0,72$) y con la arena muy fina ($r:-0,65$), mientras que con la arcilla y la humedad gravimétrica presento una relación positiva altamente significativa de $r:0,88$ y $r:0,89$, respectivamente, debido principalmente a la capacidad que presenta la arcilla para intercambiar cationes en la solución acuosa del suelo y su capacidad de retención hídrica como se evidencia en la correlación de la tabla 14.

3.2.4 Análisis de correlación (r) de las propiedades físicas con los diferentes factores de erodabilidad

Se correlacionaron las propiedades físicas con los factores de erodabilidad calculados en cada método propuesto a través del coeficiente de correlación de Spearman, los resultados se ilustran en la tabla 17, en la que se identifican las relaciones más sobresalientes entre el factor K calculado por el método 1 (K_1), método 2 (K_2), método 3 (K_3) y las variables físicas estudiadas, de esta manera se concluye que:

Tabla 17 Correlación (r) entre las propiedades físicas del suelo y el factor K

	A	Ar	L	Amf	Da	Dr	Hum	DPM	DGM
K_1	0,02 0,934	-0,66** 0,007	0,73** 0,002	0,84** <0,0001	-0,06 0,829	0,15 0,590	-0,64** 0,010	0,22 0,418	-0,25 0,354
K_2	-0,32 0,238	0,30 0,268	0,01 0,948	-0,26 0,343	0,61* 0,015	0,40 0,135	0,43 0,104	-0,41 0,123	-0,35 0,205
K_3	0,008 0,977	-0,65** 0,008	0,74** 0,001	0,83** 0,0001	-0,05 0,838	0,10 0,700	-0,62* 0,014	0,23 0,401	0,26 0,355

*: Nivel de significancia al 5%; **: Nivel de significancia al 1%

Tomado de: Autores (2017)

K_1 y K_3 presentaron una moderada relación negativa con las variables arcilla ($r:-0,66$ y $r:-0,65$ respectivamente) y humedad gravimétrica ($r:-0,64$ y $r:-0,62$, respectivamente), lo que indica que éstas tienen mucha influencia sobre la susceptibilidad del suelo, presentando una proporcionalidad inversa al factor K, lo que permite concluir que los

altos porcentajes de estas dos variables favorecen la resistencia de los suelos a la erosión.

Los resultados de la correlación entre los factores de erodabilidad y la humedad gravimétrica del suelo difieren de los obtenidos por Pardo (2014), el cual afirma que el agua presente en el suelo separa las partículas del mismo y así disminuye la fuerza de cohesión entre ellas, lo que genera una disminución de su defensa frente al impacto de las gotas de lluvia; aumentando la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. La diferencia en las condiciones de las zonas en las que se realizó cada estudio puede ser la razón por la cual se obtuvieron resultados distintos, ya que el clima, el material parental, la mineralogía de arcillas, el uso del suelo, entre otras, no son similares.

Sin embargo, un estudio realizado por Maldonado (2010), asegura que la humedad inicial de un suelo tiene directa influencia en la erodabilidad del mismo, ya que al aumentar la humedad inicial en el suelo hasta llegar al límite plástico la erosión es menor, por lo que concluye que para valores extremos de humedad, la erodabilidad es menor por efectos de la compactación experimentada o el cambio en la consistencia del suelo para altas humedades.

Para el limo y la arena muy fina se obtuvieron valores de correlación de 0,73 y 0,84 para K_1 y 0,74 y 0,83 para K_3 , respectivamente; lo que indica una fuerte relación positiva entre estas variables y el factor de erodabilidad. Lo cual corrobora lo expuesto por Lal (1988), que la erodabilidad entre surcos tiende a aumentar con mayor contenido de limo y a disminuir con mayor cantidad de arena y arcilla; sin embargo las arenas muy finas se comportan de manera similar al limo, aumentando la susceptibilidad del suelo a la erosión.

Para el factor K del método 2 (K_2) se presentó una correlación positiva moderada con la densidad aparente, con un $r:0,71$, lo que coincide con los resultados obtenidos en estudios realizados por Rivera (1999), Hincapié y Rivera (2003) y Ramírez et al. (2009), donde los bajos valores del factor K estaban relacionados con suelos que presentaron valores bajos de densidad aparente.

3.2.5 Análisis de componentes principales (ACP) entre las propiedades físicas del suelo con relación a los factores de erodabilidad en cada zona

La tabla 18 muestra los eigenvalores para cada componente del análisis, los cuales fueron calculados con los promedios de las propiedades físicas y los factores de erodabilidad. Se aprecia que los dos primeros componentes explican el 78,22% de la variación total, por lo tanto se seleccionaron las variables con valores más altos en cada componente. En la tabla 19 se establecen los pesos de cada variable en el biplot, evidenciando que los de mayor peso son más influyentes dentro del análisis de componente principales.

Tabla 18 Eigenvalores de los componentes principales para las propiedades físicas del suelo

Componente	Valor propio	% de varianza	% varianza acumulada
1	6,56201	54,683	54,683
2	2,8245	23,537	78,221
3	1,67424	13,952	92,173
4	0,939256	7,827	100,000

Tomado de: Autores (2017)

Tabla 19 Pesos de los componentes principales de las propiedades físicas del suelo

Ítem	Componente 1	Componente 2
K ₃	0,368744	-0,107667
K ₂	-0,133818	0,182552
K ₁	0,361961	-0,130132
%A	0,102473	-0,372117
%Ar	-0,331069	0,257549
%Hum	-0,290939	0,394878
%L	0,340105	0,085868
Amf	0,377668	-0,0958192

Ítem	Componente 1	Componente 2
Da	-0,168604	-0,442061
DGM	-0,268142	-0,399916
DPM	-0,284829	-0,372623
Dr	0,265691	0,258192

Tomado de: Autores (2017)

De acuerdo al gráfico 2, el primer componente está asociado con los métodos de Wischmeier y Smith (ecuación y nomograma); y los contenidos de arcilla, limo y arena muy fina. En cambio, el segundo componente está asociado con los contenidos de arena, humedad gravimétrica, densidad aparente, el DGM y DPM.

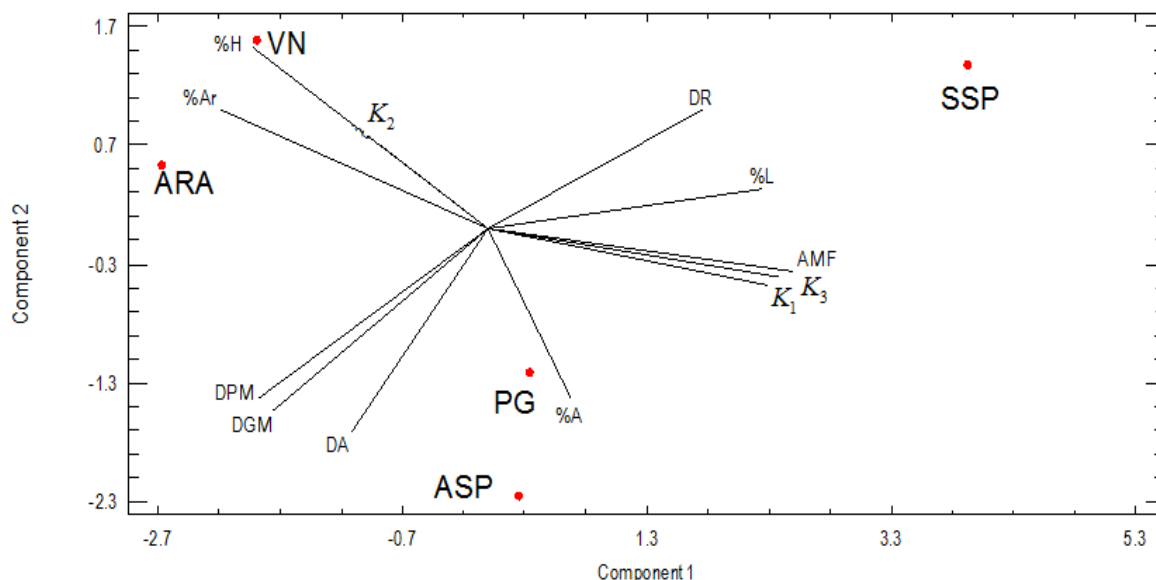


Gráfico 2 Biplot de la relación entre la erodabilidad por tres métodos y las propiedades físicas de varios sistemas de suelo

Tomado de: Autores (2017)

Los suelos de la zonas agrícola recién arada y con vegetación nativa se asocian con valores altos de arcilla, humedad y erodabilidad por el método de Paulet; la zona de sistema silvopastoril está relacionada con alto contenido de limo y arena muy fina, y valores altos de erodabilidad con los métodos de Wischmeier y Smith; las zonas de pastoreo de ganado y agrícola solo pasto están asociadas con altos valores de

erodabilidad por los métodos de Wischmeier y Smith y alto contenido de arena muy fina. Los DGM y DPM no tuvieron asociación con ningún sistema de suelo

De la correlación lineal y el análisis de componentes principales de las propiedades físicas del suelo se deduce que valores altos de erodabilidad están asociados con bajos contenidos de arcilla y humedad y altos contenidos de limo y arena muy fina. Estos resultados coinciden con investigaciones realizadas por diferentes autores como Lal (1988); Rivera (1999); Echeverría et al. (2006) y Pardo (2014)

3.2.6 Análisis de correlación (r) de las propiedades químicas con los diferentes factores de erodabilidad

Se correlacionaron las variables químicas con los factores de erodabilidad calculados en cada método propuesto por medio del coeficiente de correlación de Spearman, como se ilustra en la tabla 20, de esto se puede inferir que las relaciones más sobresalientes entre el factor K calculado por los métodos 1 (K_1) y 3 (K_3), y las propiedades químicas estudiadas son:

Los valores de K_1 y K_3 presentan una relación negativa moderada con las variables Mg y CICE con niveles de correlación de $-0,56$ y $-0,65$ respectivamente para K_1 y $-0,54$ y $-0,63$ respectivamente para K_3 , con lo que se concluye que estas propiedades tienen mucha influencia en la resistencia del suelo a procesos de erosión hídrica, ya que a mayores valores de éstas se disminuye el valor de la erodabilidad. Un estudio de Rivera (1999) en la región cafetera de Colombia, demostró que al incrementar la CICE se disminuyen los valores de erodabilidad en el suelo. Contrario a los resultados de esta investigación, un estudio de García (1994) citado por Torrente et al. (2003) establece que la alta saturación de Mg^{+2} tiene características dispersivas y que causa efectos adversos similares a los del Na^{+} , produciendo oclusión de poros y disminuyendo las propiedades de flujo de los suelos, aumentando su susceptibilidad a la erosión.

En cuanto a la materia orgánica, estudios de Rivera (1999); Hincapié y Rivera (2003) y Ramírez et al. (2009) demuestran que presenta una alta correlación negativa con la erodabilidad, ya que esta propiedad favorece la resistencia del suelo ante la erosión

hídrica, sin embargo en este estudio se obtuvieron bajos coeficientes de correlación entre la erodabilidad y esta propiedad, posiblemente por la poca variabilidad que presentaron los valores de esta última (Tabla 9).

El calcio presentó correlación significativa con los factores de erodabilidad K_1 ($r:-0,62$) y K_3 ($r:-0,61$), puesto que este elemento es considerado como un agente cementante del suelo, floculador de la estructura, el cual mejora características físicas, mecánicas y químicas del suelo (Fernández 1998). Al favorecer la estructura, el suelo se vuelve más resistente a la erosión, motivo por el cual se presenta relación negativa con los factores mencionados.

Tabla 20 Correlación (r) entre las propiedades químicas del suelo y el factor K

	pH	M.O	S	P	Ca	Mg	K	Na	CICe
K_1	-0,55* 0,032	-0,49 0,063	-0,34 0,216	-0,40 0,138	-0,62* 0,013	-0,56* 0,028	-0,49 0,061	0,17 0,543	-0,65** 0,008
K_2	0,35 0,201	0,04 0,884	-0,24 0,384	-0,01 0,980	0,43 0,111	0,27 0,334	-0,27 0,319	0,09 0,740	0,33 0,229
K_3	-0,51 0,052	-0,49 0,065	-0,35 0,199	-0,36 0,191	-0,61* 0,015	-0,54* 0,038	-0,47 0,079	0,16 0,570	-0,63* 0,012

*: Nivel de significancia al 5%; **: Nivel de significancia al 1%

Tomado de: Autores (2017)

3.2.7 Análisis de componentes principales (ACP) entre las propiedades químicas del suelo con relación a los factores de erodabilidad en cada zona

La tabla 21 muestra los eigenvalores para cada componente del análisis, los cuales fueron calculados con los promedios de las propiedades químicas y los factores de erodabilidad. El primer y segundo componente contribuyeron con el 79,28% de la variabilidad. En la tabla 22 se establecen los pesos de cada variable en el biplot, evidenciando que los de mayor peso son más influyentes dentro del análisis de componente principales.

Para el análisis de componente principal no se utilizó K_2 puesto que este no correlaciono significativamente con ninguna propiedad química del suelo, como se evidencia en la tabla 20.

Tabla 21 Eigenvalores de los componentes principales para las propiedades químicas del suelo

Componente	Valor propio	% de varianza	% varianza acumulada
1	6,78758	56,563	56,563
2	2,72573	22,714	79,278
3	1,67156	13,930	93,207
4	0,815136	6,793	100,000

Tomado de: Autores (2017)

Tabla 22 Pesos de los componentes principales de las propiedades químicas del suelo

Ítem	Componente 1	Componente 2
Ca	0,29165	0,191148
CICe	0,352621	-0,00236834
K	0,244412	-0,347721
%MO	0,267961	-0,318008
K_3	-0,37503	0,0174198
K_1	-0,376688	0,0507188
Mg	0,34069	-0,0220763
Na	-0,269317	-0,112559
P	0,138927	0,469613
pH	0,292073	0,291421
S	0,254483	-0,399617

Tomado de: Autores (2017)

De acuerdo al gráfico 3, el primer componente está asociado con los métodos de Wischmer y Smith (Ecuación y nomograma); la CICe y el contenido de Mg. El segundo

componente está asociado con el método de Paulet y los contenidos de K, P y S. Los altos valores del factor K por el método de Paulet están asociados a la zona agrícola recién arada con altos contenidos de CICE, K, S, Mg y P. La zona de vegetación nativa está asociada a altos contenidos de M.O, S, Mg, K, y CICE, y los valores más bajos de erodabilidad con los métodos de Wischmeier y Smith.

Las zonas agrícola solo pasto y sistema silvopastoril solo están asociadas con altos valores de erodabilidad por los métodos de Wischmeier y Smith. Y finalmente la zona de pastoreo de ganado está asociada a bajos valores de erodabilidad con los métodos de Wischmeier y Smith (Ecuación y nomograma).

Estos resultados confirman lo obtenido en la correlación lineal de la tabla 20 y el estudio realizado por Hincapié (2001), donde la mayoría de las propiedades químicas no correlacionaron significativamente con los factores de erodabilidad a excepción de la CICE, el Mg y el Ca. De lo que podría deducirse que las propiedades químicas tienen menor influencia en la erodabilidad del suelo en comparación con las propiedades físicas.

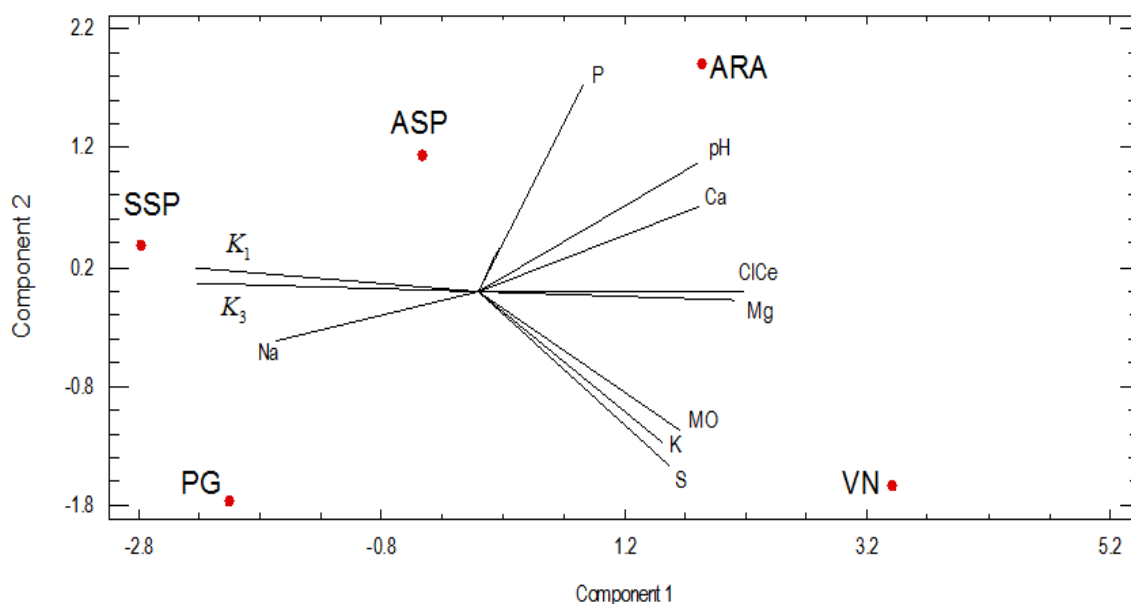


Gráfico 3 Biplot de la relación entre la erodabilidad por tres métodos y las propiedades químicas de varios sistemas de suelo

Tomado de: Autores (2017)

3.3 PERSPECTIVA AMBIENTAL

Los resultados obtenidos en la presente investigación en cuanto a la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en el área de estudio, revelan en gran parte una de las principales problemáticas ambientales que se presentan en el municipio de San Carlos – Córdoba. Los altos y moderados valores de erodabilidad implican mayor susceptibilidad del suelo, lo que conlleva a grandes pérdidas del recurso si no se le realizan las prácticas de manejo apropiadas. Las pérdidas de suelo afectan al ecosistema por la degradación del mismo y la acumulación de sedimentos en corrientes y cuerpos de aguas. La sedimentación o los procesos relacionados con el movimiento y depósito de suelos erosionados dentro del sistema hidrológico, incide en el aumento de la turbidez y el color de las aguas, favoreciendo los procesos de eutrofización en la microcuenca (Ortega y Mejía 2014).

La degradación del suelo como una consecuencia de la erosión ocasiona pérdida de materia orgánica y de nutrientes, alteración de las propiedades físicas, hidráulicas y químicas y, consecuentemente, alteración de la fertilidad del suelo, lo cual debe considerarse como un detrimento de la calidad del mismo, por lo que deben tomarse las medidas preventivas para evitar o controlar el proceso de erosión hídrica (Hincapié y Salazar 2011). Los procesos erosivos disminuyen la fertilidad del suelo, ya que generan la pérdida de una gran cantidad de nutrientes (FAO 1992); esto, a su vez ocasiona una reducción de ingresos económicos para los pequeños agricultores de la zona. En este estudio se evidencia que suelos con alta susceptibilidad a la erosión hídrica presentaron menores contenidos de materia orgánica y valores bajos de capacidad de intercambio catiónico en comparación con los suelos de menor erodabilidad.

La ganadería es una de las prácticas que actualmente está deteriorando al recurso suelo debido a las técnicas inadecuadas en su manejo, aumentando la susceptibilidad de éste a la erosión. La producción agropecuaria en el municipio de San Carlos tiene unos profundos efectos en el medio ambiente en conjunto; son la principal fuente de contaminación del agua y suelos por nitratos, fosfatos y plaguicidas, los cuales al producirse pérdida del recurso son arrastrados a sistemas acuáticos u otras zonas de ganancia de material (CVS 2008; Ortega y Mejía 2014). Así mismo, el proceso conocido

como potrerización, por parte de los propietarios de tierras, para alimentar una ganadería con afanes de progreso económico, consistente en tumba de bosques, pique, quema, siembra tradicional, rastros o barbechos y aplicación de herbicidas para las actividades de crías, levante y ceba, son las principales causas que han conducido a un conflicto entre el uso potencial recomendado y el uso actual del suelo en la zona, acelerando el deterioro del recurso, diversidad y productividad del ecosistema (Municipio de San Carlos 2005).

Aumentando la resistencia del suelo a la erosión se mejoran la calidad y la salud del recurso, promoviendo la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; atenuando contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); favoreciendo la salud de plantas, animales y humanos, y conservando el estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos o productos microbianos (Bautista et al. 2004).

3.4 PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE MANEJO DEL RECURSO PARA MITIGAR LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

El análisis de los factores que influyen en la erodabilidad del suelo lleva a discutir la cuestión del manejo de la erosión, ésta es función de la erosividad y la erodabilidad; la erosividad depende exclusivamente de la lluvia y, por tanto, no se puede controlar. La erodabilidad depende en parte de las propiedades del suelo, que tampoco pueden cambiarse, y del uso que se le esté dando al recurso así como de los sistemas de cultivos implementados, estos últimos factores sí pueden ser controlados para aumentar la resistencia de los suelos a la erosión (Hudson 1982).

Actualmente se considera a la cobertura vegetal como la mejor herramienta para controlar la erosión, ya que brinda protección al suelo contra los agentes erosivos. Sin embargo el manejo de la cobertura vegetal, requiere de la integración de diversas prácticas, entre las cuales destacan la agricultura de conservación, la introducción de cultivos alternativos, la reconversión de áreas agrícolas de baja productividad a uso pecuario, el manejo y rehabilitación de pastizales y el establecimiento y manejo de sistemas agroforestales (Lored 2005).

A continuación se enumeran las prácticas de manejo de suelos propuestas para cada zona, teniendo en cuenta que sean económicamente viables para el agricultor y adecuadas a las características del terreno.

3.4.1 Prácticas de manejo para la zona 1 (Pastoreo de ganado)

En la descripción de perfil de suelos realizada en campo para esta zona, se evidencia un suelo proveniente de rocas sedimentarias como la arcillolita, con texturas que varían desde franco arcillosas hasta arcillosas y presencia de gravilla en los horizontes superficiales, estructuras blocosas con tamaños finos a muy finos. Es una zona con pendiente mayor al 17% lo que la cataloga como muy inclinada según el IGAC (1995) y a pesar de no presentar historial de uso agrícola, es un área afectada constantemente por el pisoteo del ganado lo que se evidencia en una densidad aparente promedio del $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ que ligada a este tipo de texturas lo califican como una densidad aparente alta.

Según el método de Paulet y el nomograma, ésta zona se considera como fuertemente erodable, mientras que el método de la ecuación de Wischmeier y Smith la califica como moderadamente erodable; razón por la cual se hace necesario la aplicación de prácticas de manejo del recurso para minimizar su susceptibilidad a los procesos erosivos, enfatizando en mejorar la permeabilidad del suelo ya que al momento de realizar la descripción del perfil en campo se identificó un horizonte de acumulación de arcillas eluviadas lo que dificulta la infiltración del agua hacia el resto del perfil ocasionando escurrimiento superficial, arrastre de material y pérdida del suelo.

Las prácticas de manejo que se proponen para esta zona son las siguientes:

- 1) Zanjas de infiltración:** Son canales sin desnivel contruidos en forma transversal a la pendiente del terreno, las cuales tienen por objetivo captar el agua que escurre y favorecer su infiltración en el suelo, disminuyendo los procesos erosivos. Las zanjas de infiltración no modifican la inclinación del terreno, pero si la longitud de la pendiente, al seccionar el espacio de escurrimiento total. Con ello, disminuye la erosión hídrica al infiltrarse la escorrentía superficial (Pavez 2004).

El diseño de las obras de conservación y aprovechamiento de suelos y aguas, debe considerar previamente cuatro conceptos hidrológicos; el periodo de retorno, las curvas intensidad-duración-frecuencia, la velocidad de infiltración de los suelos, y el coeficiente de escorrentía, para así diseñar las obras que favorecen la infiltración de aguas lluvias en condiciones desfavorables. Esta situación permite trabajar con un margen de seguridad, el cual minimiza el riesgo de que las obras sean sobrepasadas, de tal manera que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería hidrológica (Pizarro et al. 2004). Asimismo, este diseño de zanjas de infiltración debe atender fundamentalmente a los dos criterios a) El espaciamiento entre zanjas debe ser tal que permita un control adecuado de la erosión. b) La capacidad de captura de agua de las zanjas debe permitir el almacenaje de un determinado volumen de escorrentía producido por la lluvia.

- 2) **Barreras vivas:** Son hileras de plantas perennes y de crecimiento denso sembradas a través de la pendiente, casi siempre en contorno. El objetivo de dichas barreras es reducir la velocidad del agua que corre sobre la superficie del suelo y retener las partículas de sedimento que están siendo transportadas; disminuyen también la velocidad del viento y protegen el suelo (Tayupanta y Córdova 1990).

La distancia entre las barreras vivas va a depender del tipo de suelo, la pendiente, el tipo de cultivo que se va a utilizar y el régimen de lluvias. Cuanto mayor sea la pendiente, menor la profundidad del suelo, y mayor la intensidad de lluvias, menor debe ser la distancia entre las barreras (Gaete y Carrasco 2002). Algunos árboles y arbustos recomendados para implementar este tipo de práctica son el matarraton (*Gliricidia sepium*), el limoncillo (*Cymbogon citratus*), y el piñón (*Jatropha curcas*), propias de la zona.

Es recomendable que estas dos prácticas de manejo y conservación se realicen de manera simultánea ya que las barreras vivas actúan como filtros del agua de escurrimiento, reteniendo el suelo y evitando que se depositen en las zanjas. Además el agua que es retenida en las zanjas de infiltración contribuye a la humedad del suelo,

favoreciendo el desarrollo de las plantas que forman las barreras vivas (Gaete y Carrasco 2002).

Se debe hacer rotación de potreros, que impidan el sobrepastoreo y se fomente el cubrimiento denso del pasto durante cada descanso, ayudado con fertilización oportuna, luego de cada rotación.

3.4.2 Prácticas de manejo para la zona 2 (Vegetación nativa)

Actualmente esta zona no presenta historial de uso agrícola, se observa abundante cobertura vegetal consistente en gramas naturales. En la descripción del perfil de suelo realizada se encontró que se trata de un suelo superficial que no supera los 15 cm de espesor hasta llegar al saprolito, con una textura arcillosa y abundante pedregosidad, presenta una arcilla expandible 2:1 (Monmorillonita), la cual ocasiona que el suelo se torne muy plástico y pegajoso cuando está húmedo y muy duro cuando se seca, dando lugar a cuarteaduras y fisuras de tamaños y profundidades diferentes. Este orden de suelo puede clasificarse como Inceptisol Vértico de acuerdo a las características mencionadas.

Los resultados arrojados por los tres métodos califican esta zona como una de las de menor erodabilidad con respecto a las demás, sin embargo el área presentó el valor más alto para la pendiente, que junto a los procesos de expansión y secado del suelo favorecen la erosión hídrica.

Debido a sus reacciones de contracción y expansión que dependen de su contenido de humedad, estos suelos afectan negativamente las labores agrícolas y la instalación de obras de ingeniería, por tal razón las prácticas de manejo del suelo que se podrían ajustar a esta zona son:

- 1) Pastos con cubrimiento denso:** Se logra variando la carga animal e implementando programas de rotación, sin sobrepastoreo. La pérdida de suelo decrece cuando hay una efectiva cobertura vegetal y por el efecto beneficioso tanto de la hojarasca acumulada en la superficie del suelo como los “mulch” agregados y los abonos verdes enterrados, ya que se reduce la velocidad y la

cantidad de escurrimiento, se aumenta la infiltración y por lo tanto disminuye la pérdida de suelo y de nutrientes. Utilizar especies como pasto alambre (*Brachiaria humidicola*), en las zonas para minimizar los problemas de erosión ya que éstas cubren mejor el suelo y se adaptan a las condiciones de fertilidad para cada área (Arellano 2000; Martínez et al. 1995).

- 2) Barreras muertas (FAO 2015):** Es una práctica novedosa que se está implementando actualmente, las barreras muertas son muros de rocas o de rastrojos, colocados conforme a las curvas a nivel y sirven para disminuir la velocidad del agua de escorrentía y evitar la erosión de los suelos; esta buena práctica facilita la infiltración del agua de lluvia y del terreno y del tipo de suelo. Para el diseño o construcción de la curva de nivel se necesita un nivel A; con este instrumento se hace la curva a nivel, en seguida se hace con el pico un trazo y se excava una zanja de 12 centímetros de profundidad y 25-35 centímetros de ancho para formar la base.

Para esta práctica es importante que se coloquen las rocas grandes abajo y a los lados (las rocas más grandes y planas se ubican como base del muro) y con las pequeñas se van rellenando los espacios vacíos, para que éstas queden firmes y formen un muro ligeramente piramidal. El alto de las barreras muertas depende de la cantidad de piedras disponibles en el terreno y de la pendiente del mismo. La altura mínima debe ser de 30 cm; mientras más plano sea el terreno menor será la altura de la barrera. La distancia entre las barreras depende de la pendiente, la mínima debe ser de 8 m de longitud, el ancho de la barrera puede variar de 10 a 80 cm, dependiendo de la disponibilidad de rocas. Esta práctica se propuso teniendo en cuenta la cercanía de arroyos al área de estudio donde se evidenció la presencia de una gran cantidad de rocas apropiadas para este fin.

3.4.3 Prácticas de manejo para la zona 3 (Agrícola recién arada)

En esta zona se evidencia arrastre de material producto de la escorrentía superficial por su alta pendiente, es una zona que fue sometida al arado con discos recientemente y se halla sin cobertura vegetal. En la descripción de perfil de suelos se encontraron solo dos

horizontes; un Ap de textura franco arcillosa, el cual dificulta la infiltración del agua en el suelo favoreciendo el escurrimiento superficial y un horizonte C conformado por el saprolito, tratándose de un suelo poco evolucionado.

Según las metodologías de Wischmeier y Smith para el factor de erodabilidad, en esta zona los suelos se encuentran entre los menos erodables catalogados como moderadamente erodables para la ecuación y el nomograma. Por otro lado, según el método de Paulet esta zona presentó el valor más alto para el factor de erodabilidad entre los cinco suelos analizados en el estudio, debido a sus porcentajes de arena los cuales oscilan de 40% a 42% y valores de densidad aparente ($1,60$ a $1,75 \text{ g cm}^{-3}$), considerados altos para este tipo de texturas según la relación establecida por el USDA (1993).

Las prácticas de manejo más recomendables para esta zona son:

- 1) **Cobertura muerta o mulch:** La cobertura del terreno con rastrojos o residuos vegetales es muy eficaz para conservar los suelos y la humedad. Los rastrojos de cobertura forman una sobre capa que amortigua la fuerza de las gotas de lluvia y los rayos del sol. Este tipo de cobertura suministra materia orgánica al suelo en forma constante, protección contra cambios extremos de temperaturas, facilita el desarrollo de la fauna menor del suelo y reduce al mínimo las pérdidas de nutrientes por lavado.

Las coberturas vegetales favorecen la conservación del suelo y mitigan el efecto erosivo del agua, en épocas de intensa sequía el suelo conserva mayor humedad. Las coberturas evitan la evaporación por radiación solar, disminuyen la temperatura del suelo y del aire a través de la evapotranspiración, favorecen la microvida del suelo y por ende mejoran la nutrición de las plantas (Turbay et al. 2014).

La aplicación de esta práctica reduce la evaporación del suelo, conserva la humedad, suprime el crecimiento de malezas, controla la estructura del suelo y la temperatura, influye en los microorganismos del suelo y además es estéticamente agradable (Kader et al. 2017) .

Para Traub (2011) los mayores efectos de esta técnica de manejo se dan sobre las propiedades físicas del suelo; especialmente en la porosidad total y en la estabilidad de agregados, las cuales son fundamentales para disminuir la susceptibilidad del suelo a la erosión.

- 2) Aplicación de enmiendas orgánicas:** Son sustancias orgánicas que se aplican al suelo con el fin de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Es recomendable tratar los residuos orgánicos antes de añadirlos al suelo mediante algún proceso de estabilización; el compostaje es uno de los más eficaces y utilizados para evitar su fermentación, producir metabolismo fitotóxico, aumentar la temperatura y disminuir la concentración de Nitrógeno en el suelo (Cabrera 2007).

Una de las enmiendas orgánicas más empleadas para las prácticas de manejo y conservación del suelo es el vermicompost; el cual es una técnica que consiste en un proceso de bio-oxidación y estabilización de la materia orgánica, mediado por la acción combinada de lombrices de tierra y microorganismos del que se obtiene un producto final estabilizado, homogéneo y de granulometría fina denominado vermicompost o humus de lombriz. Sánchez et al. (2006) evaluaron el efecto de la adición del vermicompost sobre las propiedades físicas de un suelo con características similares a las del suelo analizado en la zona número 3, observándose una mejoría en la estructura del suelo en cuanto a la distribución y estabilidad de agregados en seco y húmedo, mejorando la porosidad, aumentando los porcentajes de materia orgánica, y disminuyendo los valores de densidad aparente a medida que aumentaban la cantidad de enmienda.

Estudios similares fueron llevados a cabo por Durán y Henríquez (2010) en suelos Andisoles y Ultisoles en laboratorio e Inceptisoles en campo, ubicados en la sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica, donde se estudió el efecto del vermicompost sobre algunas propiedades del suelo y la biomasa vegetal. Los resultados demostraron que hubo un incremento en el contenido de P, Ca, Mg, K

y la CICE de los suelos analizados, demostrando una vez más la eficiencia de esta práctica de manejo y conservación.

3.4.4 Prácticas de manejo para la zona 4 (Agrícola solo pasto)

Esta es una zona dedicada principalmente al pastoreo del ganado, sembrada con pasto Toledo (*Brachiaria brizantha*) como especie introducida desde hace 4 años aproximadamente, presentó el menor porcentaje de pendiente entre las cinco zonas analizadas. La descripción del perfil de suelo indica que se trata de un suelo poco evolucionado, juvenil del orden Inceptisol con texturas que alcanzan hasta el 60% de arena, estructura blocosa y niveles de densidad aparente considerados altos por el USDA (1993) de acuerdo a la textura que presentan.

La erodabilidad en esta zona según los métodos de Wischmeier y Smith es clasificada como moderada, mientras que para el método de Paulet la zona es considerada como fuertemente erodable.

Las prácticas de manejo propuestas para esta zona son las siguientes:

- 1) Labranza mínima (FAO 2005):** La labranza mínima se define como la menor cantidad de labranza requerida para crear las condiciones de perfil cultural del suelo para la germinación de la semilla y el desarrollo de la planta. Reduce la labor de remoción y se prepara el suelo en las fajas/franjas, constituidas por los surcos donde se va a sembrar (labranza mínima continua) o en los huecos de siembra (labranza mínima individual). La función principal es disminuir la susceptibilidad del suelo a la erosión, pero también ayuda para mantener el nivel de materia orgánica y proteger la micro fauna en el suelo.

Para los sistemas de labranza mínima, el suministro de agua acumulada es mayor en comparación con otros sistemas de labranza, el aumento de los valores de densidad aparente no presenta diferencias significativas en comparación a los sistemas de labranza convencional y labranza cero. El efecto de esta práctica de manejo sobre las características del suelo conduce a un impacto positivo en la

permeabilidad del suelo, y la liberación del agua conservada regula las condiciones de las plantas y mejora la estructura del suelo (Rusu 2014).

- 2) **Siembra en contorno** (Soza y Baca 2012): Las siembras en contorno consisten en orientar las hileras del cultivo siguiendo las curvas de nivel, esta práctica contribuye a disminuir la escorrentía del agua y el arrastre del suelo. La técnica se basa en que cada surco o hilera del cultivo se opone al paso del agua de lluvia, disminuyendo la velocidad de la corriente de agua y el arrastre del suelo.

Las siembras en contorno ayudan a mejorar las condiciones del suelo y favorecen hacer un uso adecuado del mismo. Esta práctica debe ser combinada con otras como la labranza mínima o la labranza cero, ya que aislada no resuelve completamente el problema de la pérdida de suelo.

3.4.5 Prácticas de manejo para la zona 5 (Sistema silvopastoril)

De acuerdo a los resultados obtenidos a través de los métodos empleados, esta es una de las zonas que presenta mayor grado de erodabilidad calificándola como fuertemente erodable según la clasificación de USDA (1962).

Es un suelo de textura franca, con estructura blocosa, inestable estructuralmente, presenta valores moderados a deficientes de materia orgánica. La pendiente de la zona es calificada como muy inclinada según el IGAC (1995) y está sometida constantemente al pisoteo del ganado.

A continuación se proponen las prácticas de manejo del recurso propuestas para esta zona:

- 1) **Abonos verdes** (FAO 2005): Los cultivos de cobertura y abonos verdes, pueden ser cualquier especie vegetal que cubra el suelo o incremente su fertilidad. Pueden ser leguminosas comestibles como los frijoles comunes o también leguminosas usadas para forraje. Pueden ser incluso malezas, como el caso del sistema del frijol tapado, en el que la vegetación nativa que comienza a crecer

antes de que el frijol sea cosechado se deja crecer produciendo suficiente vegetación para proveer de una cobertura al próximo cultivo.

Los tipos de plantas usadas como cultivos de cobertura/abonos verdes y los tipos de tecnologías y sistemas en los que son usados, son tan numerosos y tan variados que es importante pensar en ellos como ejemplos de un solo sistema agrícola, en el que uno de los propósitos es mantener una cubierta del suelo permanente la mayor parte del año.

Según Bunch (2004) a nivel mundial, los abonos verdes y los cultivos de cobertura han demostrado ser una tecnología exitosa para mantener la fertilidad del suelo y controlar las malezas. Algunas de las numerosas ventajas que esta práctica ofrece al suelo son: incremento de la materia orgánica y ciclo nutricional, fijación del nitrógeno, prevención de la erosión hídrica, mejoramiento de la humedad del suelo. Los abonos verdes y los cultivos de cobertura pueden desempeñar un papel importante en la restauración de las tierras degradadas. Su uso puede resultar en un incremento tan significativo de la fertilidad del suelo que es posible hablar no sólo de su conservación, sino también de restauración y recuperación del suelo.

- 2) Franjas amortiguadoras:** Las franjas amortiguadoras son segmentos continuos en el terreno, trazados en contorno, bajo pasto denso y permanente, intercalados a intervalos constantes entre los lotes de cultivo. Su función es reducir la longitud de la pendiente y, consecuentemente, la capacidad de la escorrentía de separar y transportar suelo. Estas franjas deben ser lo suficientemente anchas, por lo menos cinco metros, para que la escorrentía se disperse o infiltre casi en su totalidad al transitar dentro de ellas. Sobre este principio, se asume que cortan la longitud de la escorrentía, es decir, que una vez que el agua de escorrentía ingresa en ellas, pierde el volumen y la velocidad suficientes para aportar energía al proceso erosivo en la franja de cultivo siguiente (Silva 2014).

Los beneficios que brindan las zonas de amortiguamiento para conservación, incluyen proteger los recursos del suelo, mejorar la calidad del aire y del agua,

mejorar el hábitat y la vida silvestre, así como también embellecer el paisaje. De igual manera, las zonas de amortiguamiento reducen la erosión del suelo disminuyendo la energía del agua de escorrentía, aumentan la productividad del terreno estabilizando su estructura, mejorando la calidad y retirando contaminantes del suelo (Bentrup 2008).

4. CONCLUSIONES

A través del método de Paulet, los factores de erodabilidad en todos los suelos estudiados calificaron dentro del rango de fuertemente erodables, observándose una tendencia a sobreestimar el rango de erodabilidad respecto al calculado por los métodos de la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith, por lo que el método de Paulet no sería aplicable a los suelos del área de estudio.

Además de las grandes diferencias entre los resultados obtenidos por medio de los métodos de Wischmeier y Smith y el método de Paulet, se tiene que la única variable que presentó una correlación significativa con el factor de erodabilidad calculado por el método de Paulet fue la densidad aparente.

Los factores más bajos de erodabilidad obtenidos con los métodos de la ecuación y el nomograma de Wischmeier y Smith se hallaron en la zona de muestreo número 2, con valores de 0,1572 y 0,1766 t ha h mm^{-1} mm^{-1} ha⁻¹, mientras que los más altos se obtuvieron para la zona de muestreo número 5, con valores de 0,3843 y 0,4177 t ha h mm^{-1} mm^{-1} ha⁻¹; por lo que se concluye que la zona 2 y la zona 5 son, respectivamente la de menor y mayor susceptibilidad a los procesos de erosión hídrica.

El 60% de los suelos analizados en el estudio se clasificaron dentro del rango de moderadamente erodables, lo que indica que son susceptibles a los procesos de erosión hídrica, todo esto sumado a que son suelos en colinas con relieve de quebrado a escarpado y pendientes entre 13 y 28 %, aumenta su susceptibilidad, por tanto en la zona deben considerarse la aplicación de prácticas de manejo apropiadas para aumentar la resistencia de estos suelos a la erosión hídrica.

Las propiedades físicas y químicas que presentaron mayor correlación con la erodabilidad del suelo calculada en los métodos indirectos de Wischmeier y Smith (1978) fueron: limo, arena muy fina, arcilla, humedad, pH, Ca, Mg, y CICE.

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten concluir que los métodos de Wischmeier y Smith son una herramienta eficiente para el cálculo del factor de erodabilidad intrínseca del suelo en el área de estudio.

5. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación sería conveniente realizar nuevos estudios en otras zonas del departamento de Córdoba con el fin de obtener los valores de erodabilidad de éstas y utilizar la información obtenida para clasificar los suelos del departamento de acuerdo al grado de susceptibilidad a procesos de erosión hídrica. Esta base de datos podría ser de gran utilidad como herramienta de planificación y favorecer la toma de decisiones para la aplicación de prácticas de manejo y conservación de suelos, sobre todo en las áreas de mayor susceptibilidad.

Realizar el análisis de otros factores que contribuyen a la erosión de suelos; tales como erosividad de la lluvia, para tener mayor información sobre la intensidad de los procesos erosivos y poder realizar una estimación de la erosión potencial en el área de estudio.

Para posteriores estudios se recomienda aumentar el número de muestras por zona para obtener datos más representativos del área estudiada y disminuir el porcentaje de error al que se incurre durante la realización de este tipo de investigación.

Utilizar otras metodologías para el cálculo del factor erodabilidad, como métodos de determinación directamente en campo; esto con el objetivo de obtener nuevos datos que permitan realizar comparaciones entre los diferentes métodos y tener una mejor aproximación a los grados reales de susceptibilidad a la erosión hídrica que presentan las zonas estudiadas.

Por último, para el área estudiada se recomienda la aplicación de diferentes prácticas de manejo de suelos como las propuestas en el literal 3.4 de este documento, con el fin de disminuir la susceptibilidad de estos suelos a procesos de erosión, de igual forma sería muy pertinente investigar sobre otras prácticas que resulten favorables para la zona de estudio de acuerdo a sus características y los resultados arrojados por el presente estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adema, E., Babinec, F., Peinemann, N., 2001. Nutrient losses due to water erosion in two soils of the Pampa's Caldenal. *Ciencia del Suelo* 19, Anguil - Argentina. pp. 144–154.
- Alarcón, S., Reyes, A., 2013. Evaluación de la erodabilidad de los suelos typic dystrochets, typic hapludands y andic dystrochets mediante simulador de lluvia en la microcuenca La Centella (Dagua – Valle del Cauca). *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 1, Dagua - Colombia. pp. 49–57.
- Almorox, J., López, F., Rafaelli, S., 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica, 1st ed. editum, p. 384. Universidad de Murcia, España.
- Ansorena, J., 1995. El suelo en la agricultura y el medio ambiente (II): Fertilidad del suelo, acidez y complejo de cambio. *Revista Sustrai* 30 (1), España. pp. 36–44.
- Arellano, R., 2000. Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo-Venezuela. *Forest. Venez* 44, pp. 79–86.
- Bautista, A., Etchevers, J., Del Castillo, R., Gutiérrez, C., 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13, España. pp. 90–97.
- Bentrop, G., 2008. Zonas de amortiguamiento para conservación: lineamientos para diseño de zonas de amortiguamiento, corredores y vías verdes (Informe Técnico Gral No. SRS-109). Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Estación de Investigación Sur, Asheville, NC - US.
- Bradford, J., Huang, C., 1996. Splash and detachment by waterdrops, in: *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York, pp. 61–76.
- Bunch, R., 2004. Adopción de abonos verdes y cultivos de cobertura. *LEISA Revista de Agroecología* 19, Lima - Perú. pp. 11–13.
- Cabrera, F., 2007. Materia orgánica del suelo: papel de las enmiendas orgánicas. Presentado en *Componentes del suelo: estructuras y funciones en la agricultura y medio ambiente*, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), Sevilla - España. pp. 275–291.
- Chaney, K., Swift, R., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science* 35, pp. 223–230. doi:10.1111/j.1365-2389.1984.tb00278.x

- CORDECOR, 2012. Plan de Desarrollo 2012-2015 del Municipio de San Carlos, Córdoba - Colombia.
- CVS, 2008. Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR 2008-2019). Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge, Montería - Colombia.
- Díez, J., 2007. Metodologías para la evaluación de la erosión hídrica en cuencas vertientes, en: Evaluación de la Erosión Hídrica en Cuencas Hidrográficas, Popayán - Colombia. pp. 1–15.
- Durán, L., Henríquez, C., 2010. El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta en planta. *Agronomía Mesoamericana* 21, pp. 85–93.
- Echeverría, N., Vallejos, A., Silenci, J., 2006. Erodabilidad de suelos del sur de la región semiárida argentina. *Ciencia del Suelo* 24, pp. 1–10.
- Europa, P., 2015. Europapress.es. [Online] Available at: <http://www.europapress.es/epsocial/noticia-mas-20-propuestas-defender-fertilidad-evitar-erosion-20150511141814.html> [Accessed 11 Mayo 2015].
- FAO, 2005. Tecnologías y metodologías validadas para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras, Primera ed. Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA) en Honduras y el Proyecto Sistemas de Información Científico Técnica del PESA en Honduras (SICT), Honduras.
- FAO, 1992. Erosión de suelos en América Latina. Santiago - Chile. p. 199.
- Gaete, N., Carrasco, J., 2002. Prácticas de conservación de suelos y aguas para el control de la erosión hídrica. Chile.
- Gaspari, F., Delgado, M., Denegri, G., 2009. Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana* 27, México. pp. 43–51.
- González del Tánago, M., 1991. La ecuación universal de pérdida de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología* 1. Madrid, España. pp. 13–50.
- Hincapié, E., 2001. Validación del factor erodabilidad Ki - WEPP, usando un simulador de lluvias en los suelos de la unidad Chinchiná, Melanudands (Ingeniero Agrónomo). Universidad de Caldas, Manizales - Colombia.

- Hincapié, E., Rivera, H., 2003. Validación del factor erodabilidad en suelos de la unidad chinchiná, melanudands, mediante el uso de simulador de lluvias. *Cenicafé* 54, Chinchiná - Colombia. pp. 77–89.
- Hincapié, E., Salazar, L., 2011. Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Cenicafé* 62, Chinchiná - Colombia. pp. 79–89.
- Hudson, N., 1982. *Conservación del Suelo*, en español. ed. Reverté, S. A, España.
- IGAC, 2009. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Córdoba, Primera. ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá - Colombia.
- IGAC, 1995. Resolución 02965.
- Jiménez, I., Rodríguez, L., 2008. Diagnóstico de la infiltración y permeabilidad en los suelos de la zona de recarga del acuífero Morroa en el área Sincelejo, Corozal y Morroa (Tesis Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre - Sincelejo, Colombia.
- Kader, M., Senge, M., Mojid, M., Ito, K., 2017. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil & Tillage Research* 168, pp. 155–166. doi:10.1016/j.still.2017.01.001
- Lal, R., 1988. Erosivity and erodibility, in: *Soil erosion research methods*. Ankeny, Soil and Water Conservation Society. pp. 141–160.
- Largaespada, K., Henríquez, C., 2015. Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Univ. Costa Rica San José Costa Rica* 39, pp. 137–147.
- Levine, D., 2006. *Estadística para Administración*, Primera. ed. Departamento de estadística y sistemas de información computacionales, University of New York.
- Lored Osti, C., 2005. *Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas*, Primera. ed. Campo experimental San Luis-CIRNE-INIFAP, México.
- Luciano, E., 2014. ¿Qué tan productivo es el suelo mexicano más fértil? *Univ. Nac. Autónoma México*. pp. 1–11.
- Machados, A., 1978. Primera Aproximación de los Valores del Factor de Erodabilidad k, en Algunos Suelos Colombianos. *Facultad Nacional de Agronomía* 31. Medellín, Colombia. pp. 1–22.

- Maldonado, R., 2010. Incidencia de la condición inicial en la determinación experimental de la erodabilidad de un suelo (Ingeniero Civil). Universidad del Bío Bío, Concepción. Chile.
- Manzanarez, P., Raggi, R., Gallegos, Á., 2001. Effect of soil management systems on the structural stability of a granitic soil (alfisols). R.C. Suelo Nutr. Veg. 1, pp. 34–41.
- Martínez, E., Hernández, L.A., 2009. Proceso de erosión de suelo en cuatro sistemas de cobertura vegetal en el municipio de Boaco, Nicaragua (Pregrado). Universidad Nacional Agraria, Managua - Nicaragua.
- Martínez, J., Noguera, N., Peters, W., Clavero, T., 1995. Suelos y pastos de referencia de la región Machiques-Colón. Fac. Agron. (LUZ) 12, pp. 59–69.
- Municipio de San Carlos, 2005. Esquema de Ordenamiento Territorial San Carlos Córdoba 2005 - 2019.
- Núñez, J., 2001. Manejo y Conservación de suelos, Primera. ed. Universidad Estatal a Distancia San José, Costa Rica.
- Obando, F., Villegas, A., Betancur, J., Echeverri, L., 2006. Spatial variability of chemical and physical properties of a sandy typic udutrands in the colombian central andean zone. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín 59, pp. 42–48.
- Obi, M., Salako, F., Nsukka, R., Lal, I., 1989. Relative susceptibility of some southeastern nigerian soils to erosion. CATENA - an interdisciplinary journal of Soil Science - Hydrology - Geomorphology 16, pp. 215–225.
- Ortega, J., Mejía, M., 2014. Causas y consecuencias de la contaminación del suelo. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Juigalpa, Chontales.
- Otero, L., Gálvez, V., Navarro, N., 2012. Influencia de electrolitos, especies iónicas y sodio cambiante en la dispersión del suelo. Agronomía Mesoamericana 23, pp. 189–200.
- Pardo, V., 2014. Influencia de la humedad inicial en la erosión hídrica de un talud. (Ingeniero Civil). Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile.

- Paulet, I., 1973. Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvias del Perú, Tercera. ed. Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Recursos de Agua y Suelos, Lima - Perú.
- Paulet, I., 1967. Determinación de la erodabilidad del suelo en función de algunas de sus propiedades. Separata de Anales Científicos de la Universidad Agraria 5, pp. 66–75.
- Pavez, A., 2004. Análisis del comportamiento temporal del contenido de humedad, en suelos sometidos a obras de conservación (zanjas de infiltración y subsolado), en áreas de las regiones VI, VII y VIII. Universidad de Talca, Talca - Chile.
- Pizarro, R., Flores, J.P., Sanguesa, C., Martínez, E., 2004. Zanj as de Infiltración. Universidad de Talca, Talca - Chile.
- Porta, C., López, R., 2005. Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente, 1st ed. Mundi Prensa, España.
- Ramírez, F., Hincapié, E., Sadeghian, S., 2009. Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. Cenicafé 60, pp. 58–71.
- Rivera, H., 1999. Susceptibilidad y Predicción de la Erosión en Suelos de Ladera de la Zona Cafetera Central Colombiana (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia.
- Rivera, J.H., Lal, R., Amézquita, É., Mesa, O., Chaves, B., 2010. Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 61, pp. 344–357.
- Rojas, R.A., 2000. Fundamentos Estadísticos en las Finanzas. Publicaciones Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales, Manizales, Colombia.
- Rusu, T., 2014. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. International Soil and Water Conservation Research 2, pp. 42–49.
- Salamanca, A., Sadeghian, S., 2005. LA densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 56, pp. 381–397.
- Sánchez, R., Ordaz, V., Benedicto, G., Hidalgo, C., Palma, D., 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de Vermicompost en la Chontalpa,

- Tabasco, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa - México 22, pp. 13–26.
- Santos, L.A., Gonzáles, C.A., 1999. Mapa de Índices de Erodabilidad en la Cuenca Alta del Río Bogotá Utilizando el Sistema de Información Geográfica ARC-INFOTM. Ingeniería e Investigación pp. 30–33.
- Silva, O., 2014. Conservación de Suelos y Agua. Manual de Prácticas. Conceptos y procedimientos para la evaluación y conservación de la cuenca del río Güey, Primera. ed. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela.
- Singh, J., Khera, I., 2008. Soil erodibility indices under different land uses in lower Shiwaliks 42, pp. 113–119.
- Soza, F., Baca, P., 2012. Medidas básicas de Protección Ambiental. Manual del Promotor Agrícola. Programa Manejo Integrado de Plagas de la Cooperación Suiza en América Central. Escuela Agrícola Panamericana. Zamorano, Honduras.
- Suárez, J., 2001. Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga - Colombia.
- Tayupanta, J., Córdova, J., 1990. Algunas alternativas agronómicas y mecánicas para evitar la pérdida de suelos.
- Torrente, A., Garcia, A., Escobar, C., Amézquita, E., Sampayo, T., 2003. Condiciones hidrofísicas de suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Cauca, Colombia. Acta agronómica 52, pp. 29–37.
- Torres, E., 2000. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión y de las características asociadas (infiltración y escorrentía) de dos suelos de ladera en el departamento del cauca, mediante un minisimulador de lluvia (Tesis Ingeniero Agrícola). Universidad del Valle, Cali - Colombia.
- Traub, M., 2011. Uso de una emulsión orgánica y mulch como medida de control de erosión en una ladera cultivada con vid, vi región de Chile (Pregrado). Universidad de Chile, Santiago - Chile.
- Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J., Ocampo, O., 2014. Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y

- Chinchiná, Colombia. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM pp. 95–112. doi:10.14350/rig.42298
- USDA, 1962. Soil Survey, Séptima. ed. Soil conservation service in cooperation with California Agricultural Experiment Station, California.
- USDA, 1993. Soil Survey Manual, Tercera. ed. Servicio de Conservación de Suelos. Departamento de Agricultura Manual 18, E.E.U.U.
- Velásquez, H., Menjivar, J.C., Escobar, C., 2007. Identificación de suelos susceptibles a riesgos de erosión y con mayor capacidad de almacenamiento de agua. Universidad Nacional de Colombia. Palmira 53, pp. 117–125.
- Wischmeier, W., Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. United States Department of Agriculture, U.S.
- Wischmeier, W., Smith, D., 1960. A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. International Congress of Soil Science, Madison. pp. 418–425.
- Xua, M., Lic, Q., Wilsong, G., 2015. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. Soil & Tillage Research 155, 9–18.
- Zavala, J., Palma, C., Fernández, C., López, C., Shirma, T., 2011. Degradación y Conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, Tabasco - México.







ANEXOS

Anexo 1 Clasificación de separatas del suelo según el USDA

Clasificación según USDA			
Separatas		Clasificación (μm)	Clasificación (mm)
Arena	Muy gruesa	2000 - 1000	2,0 - 1,0
	Gruesa	1000 - 500	1,0 - 0,5
	Media	500 - 250	0,5 - 0,25
	Fina	250 - 100	0,25 - 0,1
	Muy fina	100 - 50	0,1 - 0,05
Limo		50 - 2	0,05 - 0,002
Arcilla		< 2	< 0,002

Tomado de: Hincapié (2001)

Anexo 2 Código para la estructura del suelo según USLE

Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	Bloques	
	Laminar	
	Masiva	

Anexo 3 Código para la permeabilidad del suelo según USLE

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12,7 cm-h ⁻¹)
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm-h ⁻¹)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm-h ⁻¹)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm-h ⁻¹)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm-h ⁻¹)
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm-h ⁻¹)

Anexo 4 Cálculos de la permeabilidad del suelo

Para la zona número 1. Fecha: 03 – 08 – 2016. Temporada de lluvia

i	Ti (min)	Tn (min)	H'i (cm)	Hi (cm)	D (cm)	Δh (cm)	Hf (cm)	K (cm/min)	K (cm/Hr)
1	0		5	15	20	1	14		
2	15	15	6	14	20	1	13	0,01643544	0,98613
3	33	18	7	13	20	1	12	0,01444705	0,86682
4	65	32	8	12	20	1	11	0,00859782	0,51587
5	98	33	9	11	20	1	10	0,00885066	0,53104
6	132	34	10	10	20	1	9	0,00915404	0,54924
7	169	37	11	9	20	1	8	0,00900259	0,54016
8	209	40	12	8	20	1	7	0,00895646	0,53739
9	253	44	13	7	20	7	0	0,00880762	0,52846
								Prom:	0,63189
								LENTA A MODERADA	

Para la zona número 2. Fecha: 03 – 08 – 2016. Temporada de lluvia

i	Ti (min)	Tn (min)	H'i (cm)	Hi (cm)	D (cm)	Δh (cm)	Hf (cm)	K (cm/min)	K (cm/Hr)
1	0		5	20	25	1	19		
2	21	21	6	19	25	1	18	0,00931829	0,55909747
3	55	34	7	18	25	1	17	0,00600303	0,36018208
4	96	41	8	17	25	1	16	0,00520194	0,31211616
5	152	56	9	16	25	1	15	0,00398785	0,23927108
6	214	62	10	15	25	1	14	0,00377987	0,22679244
7	286	72	11	14	25	1	13	0,00342405	0,20544306
8	370	84	12	13	25	1	12	0,0030958	0,18574774
9	462	92	13	12	25	12	0	0,00299055	0,17943277
								Prom:	0,28351035
								LENTA	

Para la zona número 3. Fecha: 03 – 08 – 2016. Temporada de lluvia

i	Ti (min)	Tn (min)	H'i (cm)	Hi (cm)	D (cm)	Δh (cm)	Hf (cm)	K (cm/min)	K (cm/Hr)
1	0		5	20	25	1	19		
2	11	11	6	19	25	1	18	0,01778946	1,06736789
3	27	16	7	18	25	1	17	0,01275645	0,76538691
4	50	23	8	17	25	1	16	0,00927302	0,55638098
5	82	32	9	16	25	1	15	0,00697874	0,41872439
6	123	41	10	15	25	1	14	0,00571591	0,34295442
7	170	47	11	14	25	1	13	0,00524535	0,31472128
8	221	51	12	13	25	1	12	0,00509896	0,30593746
9	285	64	13	12	25	12	0	0,00429891	0,2579346
								Prom:	0,50367599
								LENTA A MODERADA	

Para la zona número 4. Fecha: 03 – 08 – 2016. Temporada de lluvia

i	Ti (min)	Tn (min)	H'i (cm)	Hi (cm)	D (cm)	Δh (cm)	Hf (cm)	K (cm/min)	K (cm/Hr)
1	0	0	5	20	25	1	19		
2	6	6	6	19	25	1	18	0,03261402	1,95684113
3	13	7	7	18	25	1	17	0,0291576	1,7494558
4	24	11	8	17	25	1	16	0,01938903	1,16334205
5	37	13	9	16	25	1	15	0,01717844	1,0307062
6	54	17	10	15	25	1	14	0,01378542	0,82712537
7	73	19	11	14	25	1	13	0,01297535	0,77852106
8	95	22	12	13	25	1	12	0,01182031	0,70921866
9	123	28	13	12	25	12	0	0,00982608	0,5895648
								Prom:	1,10059688
								LENTA A MODERADA	

Para la zona número 5. Fecha: 03 – 08 – 2016. Temporada de lluvia

i	Ti (min)	Tn (min)	H'i (cm)	Hi (cm)	D (cm)	Δh (cm)	Hf (cm)	K (cm/min)	K (cm/Hr)
1	0		5	20	25	1	19		
2	5	5	6	19	25	1	18	0,03913682	2,34820936
3	11	6	7	18	25	1	17	0,0340172	2,04103177
4	19	8	8	17	25	1	16	0,02665992	1,59959532
5	29	10	9	16	25	1	15	0,02233197	1,33991805
6	41	12	10	15	25	1	14	0,01952935	1,17176093
7	56	15	11	14	25	1	13	0,01643544	0,98612668
8	74	18	12	13	25	1	12	0,01444705	0,86682281
9	97	23	13	12	25	12	0	0,01196218	0,71773106
								Prom:	1,3838995
								LENTA A MODERADA	

Anexo 5 Descripción de perfiles de suelos

ZONA DE MUESTREO N° 1

FECHA: 02 – 06 – 2016

DEPARTAMENTO: Córdoba

MUNICIPIO: San Carlos

CORREGIMIENTO: Rabolargo

GEOLOGÍA: Rocas Sedimentarias

GEOMORFOLOGÍA: Colinas

TOPOGRAFÍA: Ondulada

MATERIAL DE PARTIDA: Arcillolita, con cementantes de Fe⁺³ **GANANCIAS:** No

PÉRDIDAS: Sí

DRENAJE:

EXTERNO: Rápido

INTERNO: Moderado

NATURAL: Imperfectamente drenado

PROFUNDIDAD EFECTIVA: 10 cm

NIVEL FREÁTICO: Profundo

Horizonte	Espesor	Textura	Estructura			Consistencia		Color
			Forma	Tamaño	Grado	Húmedo	Mojado	
<i>Ap</i>	0 – 5 cm	Franco Arcillo Arenoso moderadamente graviloso grueso	Bloques sub angulares	De finos a medios	Moderado a débilmente desarrollado	Friable a firme	Adhesivo y moderadamente plástico	10 YR 3/4 Café Oscuro
<i>AB</i>	5 – 10 cm	Franco Arcilloso ligeramente graviloso grueso	Bloques angulares a sub	Medios	Moderadamente desarrollado	Firme a friable	Adhesivo y plástico	7,5 YR 4/4 Café
<i>Bt</i>	10 – 21 cm	Arcilloso	Bloques angulares	Finos a medios	Débil a moderadamente desarrollado	Friable	Muy adhesivo y plástico	5 YR 4/6 Café Rojizo
<i>Bw</i>	21 cm - X	Arcilloso	Bloques angulares	Finos a muy finos	Débilmente desarrollado	Friable	Muy adhesivo y muy plástico	2,5 YR 4/6 Café Rojizo

ZONA DE MUESTREO N° 2

FECHA: 02 – 06 – 2016

DEPARTAMENTO: Córdoba

MUNICIPIO: San Carlos

CORREGIMIENTO: Rabolargo

GEOLOGÍA: Rocas Sedimentarias

GEOMORFOLOGÍA: Colinas

TOPOGRAFÍA: Ondulada

MATERIAL DE PARTIDA: Arcillolita

GANANCIAS: No

PÉRDIDAS: Sí

DRENAJE:

EXTERNO: Rápido

INTERNO: Moderado

NATURAL: Imperfectamente drenado

PROFUNDIDAD EFECTIVA: 15 cm

NIVEL FREÁTICO: Profundo

Horizonte	Espesor	Textura	Estructura			Consistencia		Color
			Forma	Tamaño	Grado	Húmedo	Mojado	
<i>Ap</i>	0 – 15 cm	Arcilloso muy pedregoso fino	Granular	Fino a muy fino	Débil a moderadamente desarrollado	Friable	Muy Adhesivo y muy plástico	10 YR 2/1 Negro
<i>C</i>	15 cm – X	Arcilloso	AESTRUCTURAL MASIVO			Muy friable	Muy adhesivo y muy plástico	2,5 Y 4/3 Café oliva

ZONA DE MUESTREO N° 3

FECHA: 02 – 06 – 2016

DEPARTAMENTO: Córdoba

MUNICIPIO: San Carlos

CORREGIMIENTO: Rabolargo

GEOLOGÍA: Rocas Sedimentarias

GEOMORFOLOGÍA: Colinas

TOPOGRAFÍA: Ondulada

MATERIAL DE PARTIDA: Arcillolita

GANANCIAS: No

PÉRDIDAS: Sí

DRENAJE:

EXTERNO: Rápido

INTERNO: Rápido

NATURAL: Moderado – Bien drenado

PROFUNDIDAD EFECTIVA: 10 cm

NIVEL FREÁTICO: Profundo

Horizonte	Espesor	Textura	Estructura			Consistencia		Color
			Forma	Tamaño	Grado	Húmedo	Mojado	
<i>Ap</i>	0 – 28 cm	Arcilloso moderadamente graviloso medio	Bloques angulares a sub angulares	Medios a finos	Moderadamente desarrollado	Friable a firme	Adhesivo y moderadamente plástico	10 YR 2/1 Negro
<i>C</i>	28 cm – X	Arcillo arenoso	AESTRUCTURAL			Friable a firme	Adhesivo y plástico	2,5 Y 4/4 Café Oliva

ZONA DE MUESTREO N° 4

FECHA: 02 – 06 – 2016

DEPARTAMENTO: Córdoba

GEOLOGÍA: Rocas Sedimentarias

MATERIAL DE PARTIDA: Arcillolita

DRENAJE:

EXTERNO: Rápido

PROFUNDIDAD EFECTIVA: 10 cm

MUNICIPIO: San Carlos

GEOMORFOLOGÍA: Colinas

GANANCIAS: No

INTERNO: Rápido

NIVEL FREÁTICO: Profundo

CORREGIMIENTO: Rabolargo

TOPOGRAFÍA: Ondulada

PÉRDIDAS: Sí

NATURAL: Moderado – bien drenado

Horizonte	Espesor	Textura	Estructura			Consistencia		Color
			Forma	Tamaño	Grado	Húmedo	Mojado	
<i>Ap</i>	0 – 12 cm	Franco Arcillo Arenoso moderadamente graviloso fino	Bloques sub angulares	De finos a muy finos	Débil a moderadamente desarrollado	Muy Friable	Adhesivo y moderadamente plástico	7,5 YR 3/4 Café Oscuro
<i>BA</i>	12 – 21 cm	Arcillo arenoso	Bloques angulares a sub angulares	Medios a fino	Moderado a débilmente desarrollado	Friable	Muy adhesivo y plástico	7,5 YR 2.5/3
<i>C</i>	21 cm – X	Arcillo arenoso	AESTRUCTURAL MASIVO			Muy friable	Muy adhesivo y plástico	7,5 YR 2.5/2

ZONA DE MUESTREO N° 5

FECHA: 02 – 06 – 2016

DEPARTAMENTO: Córdoba

MUNICIPIO: San Carlos

CORREGIMIENTO: Rabolargo

GEOLOGÍA: Rocas Sedimentarias

GEOMORFOLOGÍA: Colinas

TOPOGRAFÍA: Ondulada

MATERIAL DE PARTIDA: Arcillolita

GANANCIAS: No

PÉRDIDAS: Sí

DRENAJE:

EXTERNO: Rápido

INTERNO: Rápido

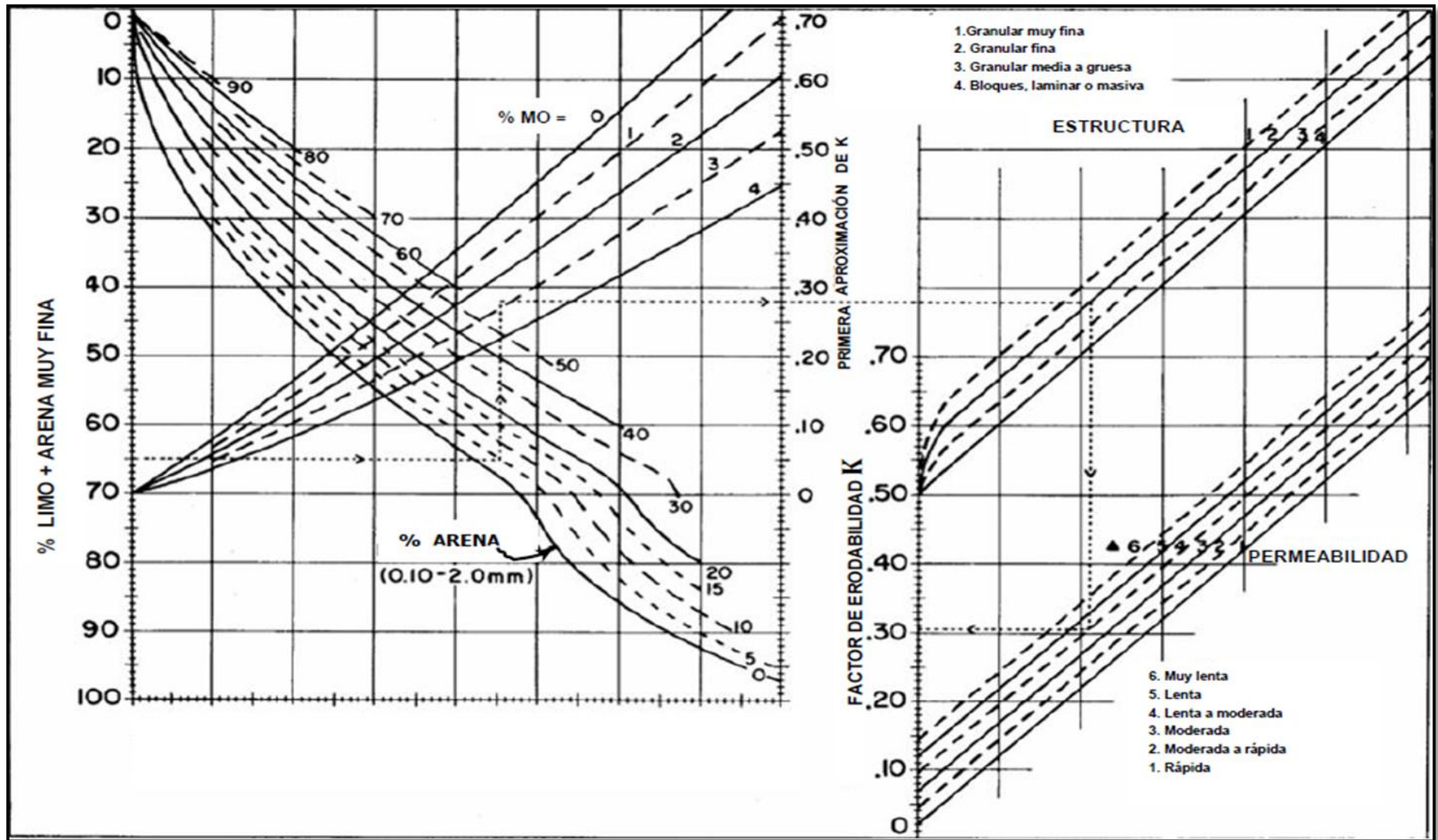
NATURAL: Moderado – bien drenado

PROFUNDIDAD EFECTIVA: 10 cm

NIVEL FREÁTICO: Profundo

Horizonte	Espesor	Textura	Estructura			Consistencia		Color
			Forma	Tamaño	Grado	Húmedo	Mojado	
<i>Ap</i>	0 – 14 cm	Franco Arcillo Arenoso	Bloques sub angulares	De finos a muy finos	Moderadament e desarrollado	Friable a firme	Moderadament e adhesivo y plástico	7,5 YR 2.5/2
<i>BA</i>	14 – 29 cm	Franco Arcilloso	Bloques angulares a sub angulares	Finos a medios	Moderado a débilmente desarrollado	Friable	Adhesivo y plástico	7,5 YR 3/2 Negro pardo
<i>CB</i>	29 cm – X	Arcillo arenoso	Bloques angulares	Fino	Muy débilmente desarrollado	Muy friable	Muy adhesivo y plástico	7,5 Y 3/3

Anexo 6 Nomograma para determinar la erodabilidad del suelo Wischmeier y Smith (1978)



Anexo 7 Registro fotográfico

Foto 1. Descripción de perfiles de suelos para las zonas 1, 2, 3 y 4



Fuente: Autores (2016)

Foto 2. Determinación de la permeabilidad del suelo por el método de Porchet



Fuente: Autores (2016)

Foto 3. *Determinación de la permeabilidad del suelo por el método de Porchet*



Fuente: Autores (2016)

Foto 4. *Medición de pendiente en campo, zona número 2*



Fuente: Autores (2016)

Foto 5. *Recolección de muestras para laboratorio*



Fuente: Autores (2016)

Foto 6. *Procesos erosivos en la zona número 1.*



Fuente: Autores (2016)

Foto 7. Erosión laminar y arrastre de material en la zona número 3.



Fuente: Autores (2016)

Foto 8. Presencia de Arcillas expansivas del tipo 2:1, zona número 2



Fuente: Autores (2016)

Foto 9. *Procesos erosivos en la zona número 4*



Fuente: Autores (2016)

Foto 10. *Zona número 5*



Fuente: Autores (2016)

Anexo 8 Resultados test de Shapiro–Wilk

Variable	W valor	Pr > W	Distribución
K ₁	0,898	0,090	No viene de una distribución normal
K ₂	0,894	0,079	No viene de una distribución normal
K ₃	0,885	0,057	No viene de una distribución normal
A	0,895	0,082	Normal
Ar	0,872	0,036	No viene de una distribución normal
L	0,840	0,012	No viene de una distribución normal
Amf	0,914	0,158	Normal
Da	0,956	0,632	Normal
Dr	0,781	0,002	No viene de una distribución normal
Hum	0,907	0,124	Normal
DPM	0,729	0,0005	No viene de una distribución normal
DGM	0,748	0,0009	No viene de una distribución normal
pH	0,900	0,097	Normal
MO	0,967	0,811	Normal
S	0,725	0,0005	No viene de una distribución normal
P	0,636	<0,0001	No viene de una distribución normal
Ca	0,961	0,717	Normal
Mg	0,789	0,002	No viene de una distribución normal
K	0,936	0,338	Normal
Na	0,778	0,002	No viene de una distribución normal
CICe	0,809	0,004	No viene de una distribución normal

Tomado de: Autores (2017)

Anexo 9 Análisis de laboratorio